Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»
Кафедра транспортных процессов и техносферной безопасности

Методические указания
к проведению практических занятий по дисциплине
«Надежность технических систем и техногенный риск»
для студентов всех форм обучения направления подготовки 20.05.01
Пожарная безопасность

Яблоновский

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Анализ аварийности во многих отраслях промышленности показывает, что инициаторами и составными частями причинной цепи происшествий являются отказы технологического оборудования, ошибочные и несанкционированные действия работающих, а также нерасчетные воздействия на них внешних факторов.

Отказы и неисправности технологического и технологического оборудования чаще всего вызваны их собственной низкой надежностью. В этой связи студенты специальности 330200, 330500 готовясь к изучению дисциплины "техника и технология инженерной защиты окружающей среды" и последующего решения задач дипломного проектирования должны владеть методикой анализа безопасности, экологичности и оценку техногенного риска производственного оборудования.

К таким вопросам относятся: расчет, оценка и оптимизация эксплутационно - технических показателей проектируемых изделий, определение номенклатурного и количественного состава ЗИП, разработка основных эксплутационно – технических документов изделия (технического описания, инструкций по эксплуатации, обслуживанию, ремонту), установление правил и мер безопасности при эксплуатации спроектированного устройства.

Работая над этими вопросами, студенты не только совершенствуют знания, полученные за время обучения, но и глубже осознают значимость правильной и качественной эксплуатации технического устройства, что позволяет им лучше подготовиться к выполнению функциональных обязанностей специалиста по инженерной защите окружающей среды.

Проведение самостоятельных исследований требует от студента знаний состояния развития науки и техники в области поставленной проблемы и в первую очередь ее недостатков и "слабых мест", на основе которых будут основываться технические, эксплутационные и иные рекомендации по созданию (совершенствованию) новых объектов техники или процессов их эксплуатации.

На обеспечение безопасности технологических процессов наибольшее влияние оказывают показатели надежности, которые закладываются в период проектирования, обеспечиваются на этапе производства и поддерживаются соответствующими эксплутационными мероприятиями.

Выбор конструктивно – компоновочной схемы технического устройства, тип, состав и конструктивное решение его составных элементов, учет условий эксплуатации, величин и характера действующих нагрузок предопределяет надежность работы ТУ в заданных условиях эксплуатации.

Использование положений теории и практики надежности позволяет при проектировании (испытаниях, эксплуатации) обоснованно решать следующие проблемы:

- выбирать наиболее рациональные схемы решения ТУ и их составных частей;
- обосновывать режим работы ТУ с учетом их сроков службы и надежности;
- определять необходимость и способы резервирования элементов техники;
- производить расчет количества запасных элементов в комплектах ЗИП, исходя из условий эксплуатации технических устройств;
- устанавливать содержание и периодичность проведения технического обслуживания ТУ на основе расчета показателей безотказности, ремонтопригодности, долговечности и сохраняемости.

Изложение методических рекомендаций по решению вышеназванных проблем и посвящено данное пособие для практических занятий.

1.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

1.1 Методологические основы исследования проблемы надежности техники

Историческое развитие общества, приводящее к возникновению новых потребностей, с одной стороны, и фундаментальные открытия естествознания, современные научные достижения, с другой стороны, становятся объективными источниками необходимости и возможности создания, применения перспективных изделий. Именно с осознания новой цели (необходимости удовлетворения изменившейся или вновь возникшей потребности) начинается и жизненный цикл технологических устройств, подлежащих исследованию в рамках практических занятий и дипломного проектирования выпускниками вузов.

Процесс создания и эксплуатации (применения) изделия включает логическую последовательность этапов и работ, основу которых составляют принимаемые решения по заданию, оценке и обеспечению определяющих свойств и, в первую очередь, безопасности, надежности, и экологичности. В процессе осуществления первого этапа – разработки технических требований (технического задания) – проводят анализ появившейся потребности и возможностей ее удовлетворения ранее освоенными или новыми изделиями. При этом задачу обоснования решения формулируют в одной из следующих постановок:

- определения целесообразности разработки технического устройства;
- оценка возможных сроков его создания;
- выбор оптимального вариантов изделия.

На второй стадии (разработка технического предложения) проводят анализ возможностей создания устройства с желаемыми потребительскими свойствами и соответствующими конструкторскими и эксплуатационными характеристиками. В этом случае задача обоснования решений заключается:

- в выборе рационального сочетания проектных параметров;
- в сравнении вариантов создаваемого изделия.

На следующих этапах эскизного и технического проектирования производства и ввода в эксплуатацию проводят детальную проработку проекта, подготавливают всю необходимую документацию; создают и испытывают опытные образцы; проверят и оценивают соответствие полученных свойств заданным в техническом задании (ТЗ).

Наиболее сложной проблемой рассмотренного процесса создания технического устройства является установление обоснованных требований по надежности и безопасности элементов и изделия в целом. В зависимости от размеров применения устройств различают три характерных случая обоснования требований к надежности:

1. Разработка изделий массового применения. В этом случае затратами на разработку и экспериментальные исследования можно пренебречь. Оптимизируются затраты на изготовление и эксплуатацию образца. Получаемый в результате уровень надежности изделия и его элементов вносят в ТЗ в качестве требуемого.
2. Разработка изделий единичного применения. В данном варианте затраты на изготовление и эксплуатацию значительно меньше издержек на проектирование образца. В ТЗ на устройство (элементы) вносят требования по надежности, соответствующие минимуму затрат на проектную разработку и экспериментальную отладку изделия.
3. Разработка устройств ограниченного применения. Здесь приходится учитывать все составляющие суммарных затрат как на разработку изделия так на изготовление, эксплуатацию всех изделий, обеспечивающих требуемое количество циклов выполнения задач с необходимой гарантией. Задание требований по надежности устройства и его элементов включает:

- выбор номенклатуры показателей надежности;
- нормирование надежности (определение требуемых количественных показателей надежности элементов изделия);
- установление доверительных вероятностей или средних квадратичных отклонений, благодаря которым нормативные значения показателей надежности изделия должны быть подтверждены к моменту завершения испытаний;
- формирование для элементов устройства организационных и технических требований по обеспечению надежности;
- установление порядка подтверждения требований надежности по этапам создания технического устройства.

Исследовательская проблема обеспечения надежности может быть сформулирована как задача принятия решения и должна содержать целевую установку, условия расчета требуемых показателей, правила выбора оптимальных альтернативных решений, обоснование на их основе рекомендаций по заданию достижению, оценке и обеспечению надежности разрабатываемого (эксплуатируемого) технического устройства.

Схематично порядок постановки и решения задачи может быть представлен в виде рис. 1, где с различной степенью детализации показаны основные операции организационной, информационной и технологической деятельности лица, принимающего решения по проблеме "надежность техники".

Используя подобную систематизацию, общую задачу управления надежностью техники можно описать следующим образом. Имеется или проектируется техническое устройство, которое должно удовлетворять определенному качеству, задаваемому обобщенным показателем надежности R. Для достижения требуемого R обслуживающий персонал (группа проектировщиков) должна иметь программу работы, которая включает цели, вырабатываемые вышестоящими звеньями управления C (тактико – технические требования к проектируемому устройству, необходимый уровень надежности $R_{опт}$ и т.п.), систему правил X (методы расчета, оценки, прогнозирования, испытаний и обеспечения надежности). На эту систему "техника – человек" воздействуют возмущающие факторы Z, которые включают как производственные, конструктивные, так эксплуатационные факторы, в результате чего возникают отклонения ΔR выражающие снижение норм и показателей надежности проектируемого или эксплуатируемого устройства.

Исходя из этого (рис. 2), общая задача управления надежностью может быть разделена на следующие частные задачи:

1. При заданном C, известном X определить R в виде единичных и комплексных показателей надежности, считая Z детерминированными величинами, имеющими соответствующие пределы изменения. Эта задача носит название задачи определения норм надежности (задания ТТТ) и, как правило, решается на этапе проектирования техники.
2. Зная C (оптимальное значение R), используют X (методы оценки λ, P, μ, $T_с$, $T_в$ и т.п.), с учетом вероятностной природы Z (законы изменения случайных величин известны), определить ΔR (отклонения от требуемых значений $P_{тр}$, $T_{0тр}$, $T_{Втр}$ и т.д.). Эта задача относится к задачам оценки показателей надежности, необходимость решения которой возникает на этапе испытаний, производства техники, так и в период его эксплуатации.
3. При известных C ($R_{опт}$), X (методах обеспечения надежности) с учетом вероятностной природы Z (реальные условия эксплуатации) обосновать комплекс $Y_э$ (систему технического обслуживания, доработок, проверок, контролей и ремонта), чтобы $\Delta R \to 0$. Эта задача поддержания надежности техники в период эксплуатации решается как заблаговременно перед вводом технических устройств (ТУ) в эксплуатацию, так и в ходе применения разработанных изделий по назначению.

В последующих разделах будут изложены методические приемы решения сформулированных выше задач.


Технологическая схема
Операционная схема
Анализ графика работы ТУ в целом
Определение t_i операции
Составление графика работ
Рассмотрение работ составных частей ТУ
Определение t_i элемента
Установл. элемент. надежн.
Определение содержания понятий отказа (б / работы) ТУ
Невозможность работы ТУ
Выход за пределы допусков
Разработка ССН ТУ при выполнении различных операций
ССН ТУ с учетом осн. элем.
ССН блока для каждой опер.
Выделение резервных, основных и вспомогательных элементов ССН
Общее резервирование
Раздельное резервирование
Расчет единичных показателей надежности
Безотказности, долговечность
Ремонтопригодности, сохран.
Оценка комплексных показателей надежности
Кг, Ког, R
$К_{ТИ}$, $К_{ПР}$
Проверка соответствия расчетных значений показателей заданным
Метод среднего квадратичного отклонения
Метод доверительных вероятностей
Обоснование рекомендаций по обеспечению надежности
Технические мероприятия
Организационные мероприятия

Рисунок 1

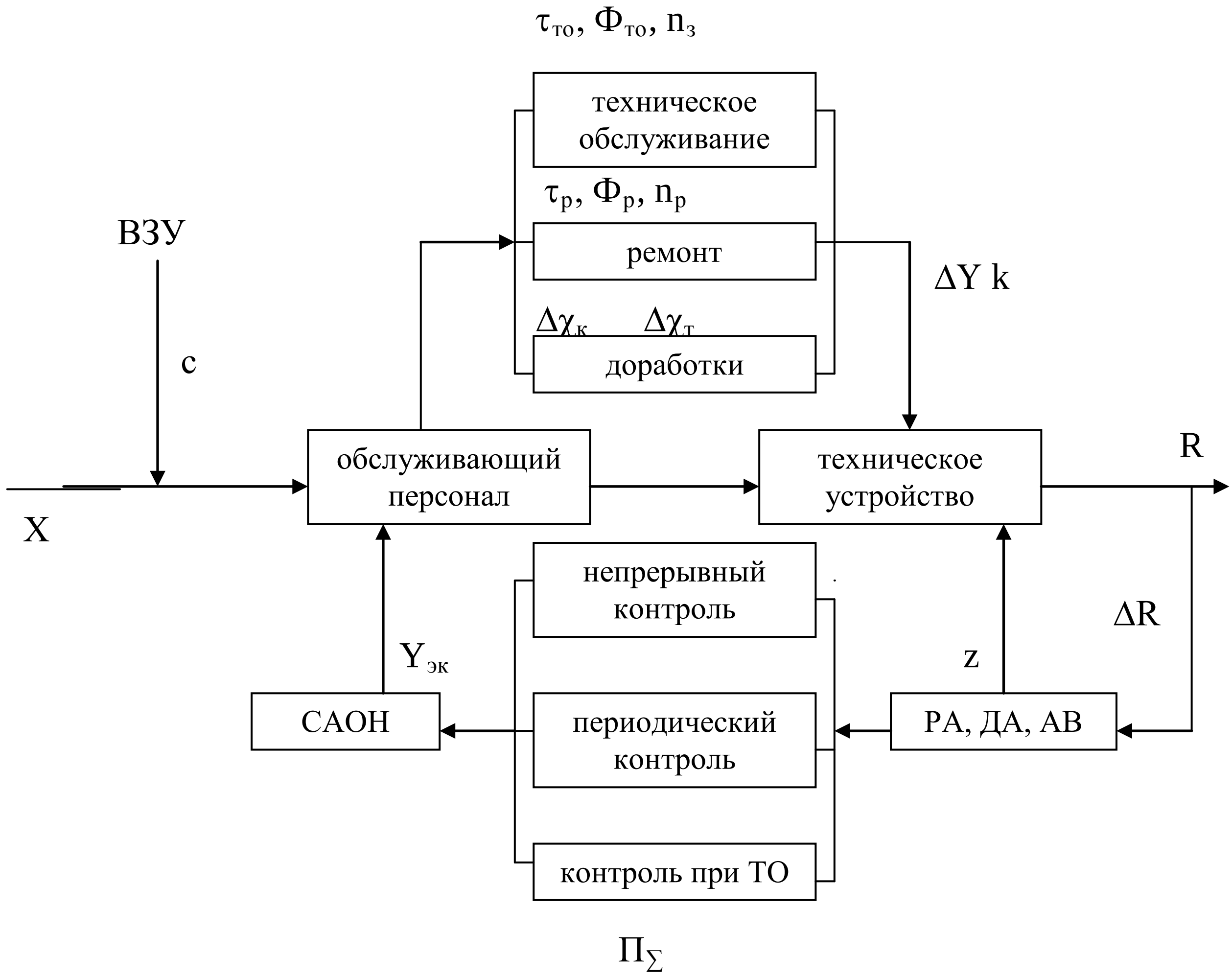

Рисунок 2

1.2 Подготовка исходных данных для решения задач надежности.

Исходные данные для расчета надежности технических устройств частью задаются заказчиком (руководителем занятий или дипломного проектирования), а остальные определяется студентом (исполнителем дипломного проекта (ДП)).

В техническом задании на ПЗ (задание ДП) должны быть указаны

- требуемая вероятность безотказной работы ТУ при выполнении поставленных задач $P_{тр}$ (t);
- наработка на отказ T_0;
- требуемое среднее время восстановление ТУ $Тв_{тр}$;
- требуемый коэффициент готовности $К_г$;
- средние квадратичные отклонения $\sigma(P_t)$, $\sigma(T_c)$, $\sigma(T_в)$ и многие другие данные.

Студентом определяются следующие исходные данные:

- интенсивность отказа ТУ и элементов λ_0;
- время τ работы элемента в составе ТУ при выполнении поставленных задач;
- среднее время восстановления элементов $Тв_j$;
- средние квадратичные отклонения $\sigma(\lambda_{0j})$, $\sigma(t_{вj})$;
- коэффициент эксплуатации $К_э$, учитывающий влияние механических перегрузок (вибрации, ударов, ускорений);
- коэффициент $К_\varphi$, учитывающий влияние влажности и ее последствий при эксплуатации ТУ.

Процесс оценки (расчета) показателя надежности включает следующие этапы:

а) составление структурных схем надежности ТУ для различных режимов его работы;

б) распределение заданных количественных показателей надежности между элементами (ТУ);

в) расчет показателей надежности;

г) оценка точности и соответствия расчетных показателей надежности заданным в ТЗ;

д) разработка мероприятий, направленных на обеспечение требуемых значений показателей надежности.

1.2.1. Составление структурных схем надежности ТУ.

Структурная схема надежности (ССН) представляет собой условную запись или графическое изображение, позволяющее описать работоспособное состояние объекта через возможные состояния его составных частей, элементов с учетом их связей и функционального назначения. ССН составляются на основании чертежей и принципиальных схем устройства и его сборочных единиц.

Работа по составлению структурных схем включает следующие этапы (2):

1. Проводится анализ всего комплекса работ, для выполнения которых предназначено ТУ. Устанавливается время выполнения каждой операции и составляется график пооперационной работы объекта при выполнении установленных для него функций.
2. Рассматривается работа составных частей ТУ при выполнении операций и определяется время их совершения. Выделяются основные и вспомогательные элементы. Примет пооперационного графика работы груза – подъемного механизма приведен в приложении (табл. 1).
3. Определяется содержание понятия «безотказная работа» ТУ в целом и составных частей, а так же понятие «отказ» устройства.

Безотказная работа ТУ будет определяться условием не возникновения отказа в течение времени выполнения объектом (элементами) требуемых функций. Под отказом понимается событие, вызывающее:

- потерю работоспособности ТУ (элемента);
- задержку во времени выполнения поставленной задачи по сравнению с графиком работ;
- выход за допустимые пределы основных параметров ТУ (элемента) и т.д.

4. Составляются структурные схемы надежности ТУ при выполнении различных операций.

Для ТУ в целом разрабатываются укрупненные ССН, в которые входят только составляющие элементы. Если составная часть выполняет несколько операций, в каждой из которых задействованы различные типы и количество элементов, ССН такой составной части разрабатываются для каждой операции.

Все элементы включаются в ССН в соответствии с последовательностью прохождения рабочего сигнала и функциональной связи элементов. Резервные элементы (части) показываются в виде параллельных цепочек основным элементом ТУ.

1.2.2. Распределение заданных показателей надежности.

Распределение может проводиться между агрегатами (системами) комплекса, совместно выполняющими поставленную задачу, и между отдельными составными частями (элементами) системы.

Если агрегат состоит из нескольких систем и в структурной схеме надежности агрегата резервирование отсутствует, то вероятность безотказной работы i – й системы определяется по формуле

$$P_{C\,i} = P_a^{\frac{n}{N}}, \qquad (1.1)$$

где n - количество блоков (элементов) i – й системы агрегата;

N – количество блоков (элементов) агрегата в целом;

P_a – заданная вероятность безотказной работы агрегата.

При наличии в структурной схеме агрегата участков с резервированием их необходимо заменить эквивалентными не резервированными.

Значения показателей надежности агрегата (системы), заданные в ТЗ, могут быть распределены между их составными частями следующими методами:

- методом весовых коэффициентов;
- методом минимизации затрат на изготовление агрегата.

Когда неизвестны или ограничены сведения о конструкции, характере и режимах работы агрегата и его составных частей, рекомендуется использовать метод весовых коэффициентов; в случае, если к агрегату предъявляется основное требование в виде минимума затрат на его изготовление, применяется второй метод. В практике расчета показателей надежности метод весовых коэффициентов нашел наибольшее распространение.

В основе этого метода лежит положение о том, что вероятность отказа i-й системы (сборочной единицы) $q_i(t)$ есть функция, зависящая от интенсивности отказов λ_i и времени наработки на отказ t_i , т. е.

$$q_i(t) = f(\lambda_i, t_i).$$

так как суммарная интенсивность отказов системы является функцией числа составных элементов n_i , то можно написать, что

$$q_i(t) = f(n_i, t_i).$$

При решении задач о распределении показателей надежности возможны три случая.

<u>Случай I</u> - распределение вероятностей отказа производится пропорционально количеству элементов, которое содержит каждая система, т. е.

$$q_i(t) = f(n_i).$$

Такое распределение осуществляется для ТУ, время работы которых в течение цикла незначительно отличается от его продолжительности $t_ц$, т. е.

$$t_i \approx t_ц .$$

При значении вероятности отказа ТУ, определяемом по формуле

$$q_i(t) = \lambda_i \cdot t_i ,$$

весовой коэффициент α_i находится следующим образом:

$$\alpha_i = \frac{n_i}{n_{ср}},$$

где n_i – число элементов в i-м устройстве;

$n_{ср}$ – среднее число элементов в одном ТУ.

В свою очередь,

$$n_{ср} = \frac{\sum_1^m n_i}{m}, \tag{1.2}$$

где m – число составных частей ТУ.

В этом случае $q_i(t)$ определяется по формуле

$$q_i(t) = \alpha\, q_{ср}(t), \tag{1.3}$$

где $q_{ср}(t) = 1 – P_{ср}(t)$; $P_{ср}(t) = \sqrt[m]{P_a(t)}$

$P_a(t)$ – определяется по формуле (1.1) или задается в ТЗ.

Пример. Вероятность безотказной работы агрегата по ТЗ $P_{зад} = 0,9$. Агрегат состоит из трех систем с числом элементов $n_1 = 200$, $n_2 = 300$, $n_3 = 400$. Распределить значение $P_{зад}(t)$ между системами.

По формуле (1.3) находим

$$P_{ср}(t) = \sqrt[3]{0,9} = 0,9655.$$

Тогда

$$q_{ср}(t) = 1 - 0,9655 = 0,0345.$$

Среднее число элементов в одной системе агрегата

$$n_{ср} = \frac{200+300+400}{3} = 300.$$

Весовые коэффициенты систем

$$\alpha_1 = \frac{200}{300};\ \alpha_2 = \frac{300}{300};\ \alpha_3 = -\frac{400}{300}.$$

Значения показателей надежности систем будут следующие:

$$q_1(t) = \frac{200}{300} \cdot 0,0345 = 0,0230$$

$$q_2(t) = \frac{300}{300} \cdot 0,0345 = 0,0345$$

$$q_3(t) = \frac{400}{300} \cdot 0,0345 = 0,0460$$

$$P_1(t) = 1 - 0,0230 = 0,9770$$
$$P_2(t) = 1 - 0,0345 = 0,9655$$
$$P_3(t) = 1 - 0,0460 = 0,9540$$

Случай 2 – распределение вероятности отказа производится пропорционально времени работы системы в течение цикла, т. е.

$$q_i(t) = f(t_i) \qquad (1.4)$$

Такое распределение осуществляется для систем, в которых число элементов примерно одинаково, т. е. $n_i \approx n_{ср}$. Весовой коэффициент при этом равен:

$$\alpha_i = \frac{t_i}{t_{ср}},$$

где t_i – время работы i-й системы в течение цикла, а $t_{ср}$ – среднее время работы за этот же промежуток времени:

$$t_{ср} = \frac{\sum_1^m t_i}{m}.$$

Тогда

$$q_i(t) = \frac{t_i}{t_{ср}} \cdot q_{зад}(t) = \alpha_i \cdot q_{зад}(t). \qquad (1.5)$$

Случай 3 – распределение показателей надежности осуществляется пропорционально количеству элементов и времени работы системы в течение цикла, т. е.

$$q_i(t) = f(n_i , t_i) .$$

Такое распределение осуществляется в тех случаях, когда известно количество элементов в отдельных системах к время их работы в течение цикла.

Весовой коэффициент при этом определяется по формуле:

$$\alpha_i = \frac{n_i \cdot t_i}{(n\ t)_{ср}}, \tag{1.6}$$

где n_i – число элементов i-й системы;

t_i – время работы системы в течении цикла.

$$(n\ t)_{ср} = \frac{\sum_1^m n_i t_i}{m}. \tag{1.7}$$

Учитывая формулы (1.6), (1,7), получим:

$$q_i(t) = \frac{n_i \cdot t_i}{(nt)_{ср}} \cdot q_{зад}(t) = \alpha \cdot q_{зад}(t). \tag{1.8}$$

I.2.3 Определение данных по интенсивности отказов элементов. Значения интенсивностей отказов элементов, используемые при оценке надежности ТУ, являются статистическими величинами, которые могут быть получены:

- при обработке данных по эксплуатации рассматриваемых или аналогичных устройств;
- в результате проведения специальных испытаний ТУ или элементов для определения показателей надежности;
- в результате проведения имитационного моделирования на ЭВМ поведения ТУ и снятия необходимых характеристик;
- заимствованием из справочников по надежности хозяйственной продукции специального назначения.

При расчете показателей надежности значения интенсивностей отказов принимаются равными табличным в том случае, если режимы и условия эксплуатации исследуемого элемента соответствуют режимам и условиям эксплуатации элементов, взятых из справочников, при которых получены данные по интенсивности отказов.

В случае, если режимы и условия эксплуатации расчетного и табличного элементов отличаются, значения интенсивности отказов должны приниматься с соответствующими поправочными коэффициентами.

В случае применения новых элементов значения интенсивности отказов определяются экспериментальным путем. Для предварительных расчетов надежности новых элементов могут использоваться табличные данные по интенсивности отказов элементов, сходных по назначению и устройству с новыми.

В пределах срока службы ТУ его составные части могут попеременно находиться в одном из двух состояний:

- участие в выполнении поставленной задачи;
- ожидание перед использованием по назначению.

В первом случае приведенные значения интенсивностей отказов элементов $\lambda_{пр}$ с учетом различных условий эксплуатации определяются по формуле

$$\lambda_{пр} = \lambda_0 \cdot К_э \cdot К_ч \,, \qquad (1.9)$$

где λ_0 – среднестатистическая интенсивность отказов при номинальных значениях Т°С и φ (табл.2 приложения);

$К_\varphi$ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние влажности на интенсивность отказов (табл. 7 приложения);

$К_э$ – коэффициент эксплуатации, учитывающий влияние механических перегрузок (вибраций, линейных ускорений, ударов) (табл. 8 приложения).

Интенсивность отказов λ_0 для механических, гидравлических, пневматических элементов принимаются равными среднестатистическим значениям (табл. 2 приложения).

Интенсивность отказов элементов электрооборудования, радиоэлектронной аппаратуры рекомендуется вычислять по формуле

$$\lambda_{пр} = \lambda_0 \cdot К_н \,, \qquad (1.10)$$

где $К_н$ – поправочный коэффициент, учитывающий электрическую и температурную нагрузки (табл. 9 приложения).

Этот коэффициент рассчитывается на основе отношения рабочих значений мощности, напряжений и т. п. к их допустимым (номинальным) значениям.

Для случая ожидания ТУ перед использованием по назначению, значения интенсивности отказов находят в соответствии со следующими соотношениями:

- для релейно-контактных элементов

$$\lambda_{хр} = 0{,}0004\, \lambda_0$$

- для электрических машин

$$\lambda_{хр} = 0{,}0003\, \lambda_0$$

- для механических, гидравлических, пневматических элементов

$$\lambda_{хр} = 0{,}0001\, \lambda_0$$

1.3. Оценка точности и соответствия расчетных показателей надежности заданным в ТЗ

1.3.1. Доверительные границы и доверительные вероятности. Для оценки показателей надежности ТУ используются как законы распределения случайных величин, так и их основные характеристики - математическое ожидание к дисперсия. Законы распределения чаще всего применяют для оценки показателей надежности отдельных элементов, так как для получения законов необходимо располагать обширным статистическим материалом (порядка нескольких сот опытов). Накопить такое количество данных (отказов, восстановлений) не всегда представляется возможным. Поэтому на практике ограничиваются оценкой параметров распределения, для вычисления которых достаточно иметь один – два десятка реализаций.

Показатели надежности, вычисленные на основе ограниченного числа опытов, всегда содержат элементы случайности. Именно поэтому экспериментально подученные параметры называет оценками параметров. Чем меньше число опытов, тем больше вероятность отклонения оценки параметра от его истинного значения. Математическая статистика установила связь между числом реализаций (отказов) n, величиной отклонения оценки параметра от его истинного значения и вероятностью этого отклонения. При этом наилучшая статистическая оценка, обеспечивающая минимальные ошибки, должна обладать следующими основными свойствами.

Оценка должна быть состоятельной, т. е. при увеличении числа реализаций оценка параметра должна сходиться по вероятности к своему параметру.

Оценка должна быть несмещенной, т. е. свободной от систематической ошибки.

Опенка должна быть эффективной. Это значит, что выбранная несмещенная оценка должна иметь наименьшую дисперсию по сравнению с другими оценками.

На практике не всегда удается добиться, чтобы оценка удовлетворяла всем этим требованиям. Может оказаться, что вычисление эффективной оценки получается очень сложным и трудоемким. В этом случае нередко удовлетворяются другой оценкой, дисперсия которой несколько больше, зато объем вычислений заметно меньше.

В качестве состоятельной и несмещенной оценки $\overline{T}_0$ для математического ожидания $\overline{T}_0^*$ принимается среднее арифметическое значение наработок между отказами τ_i:

$$\overline{T}_0^* = \frac{1}{n}\cdot\sum_{i=1}^{n}\tau_i. \qquad (1.11)$$

Статистическая дисперсия оценивается выражением

$$D^* = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\tau_i - \overline{T}_0^*)^2. \qquad (1.12)$$

При малых значениях n, вычисленная по этой формуле оценка дисперсии оказывается смещенной. Для устранения систематической погрешности достаточно в знаменателе вместо n применить значение n-1.

$$D^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\tau_i - T^*{}_0)^2. \qquad (1.13)$$

Полученные по этим формулам оценки параметров являются точечными, они оценивают неизвестный параметр T_0 одним числом и фактически представляют собой случайные величины, хотя и с существенно меньшей дисперсией, чем изучаемая случайная величина T. На практике часто требуется знать не только точечную оценку параметров, но и интервал, в котором с заданной вероятностью может находиться сам параметр. Такой интервал характеризует собой точность полученной оценки и называется доверительным интервалом. А вероятность, с которой доверительный интервал заключает в себе параметр, характеризует достоверность оценки и называется доверительной вероятностью. Границы интервала принято называть доверительными границами.

Если обозначить верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала соответственно $T^*{}_{0max}$, $T^*{}_{0min}$, то доверительная вероятность γ будет выражаться формулой

$$\gamma = P\{T^*{}_{0\,min} \leq T^*{}_{0\,max}\}$$

или иначе

$$P = \{ |T^*{}_0 - T_0| \} < E = \gamma \qquad (1.14)$$

Графически интервал, границы показаны на рис. 3.

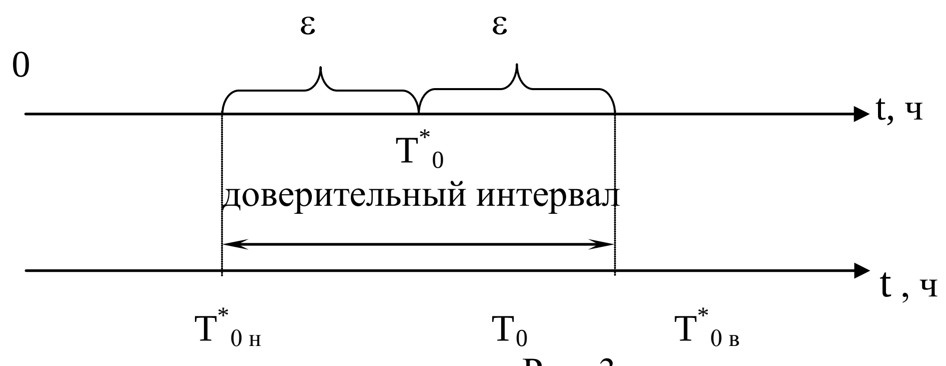

Рис. 3

Здесь γ вероятность того, что расхождение между $T^*{}_0$ и T_0 не превышает некоторого числа ε.

Если $T^*{}_0 > T_0$, то $T^*{}_0 - T_0 \leq \varepsilon$ или $T^*{}_0 - \varepsilon \leq T_0$.

Если $T^*{}_0 < T_0$, то $T_0 - T^*{}_0 \leq \varepsilon$ или $T^*{}_0 \leq T_0 + \varepsilon$.

Исходя из этого можно записать

$$P = \{T^*_0 - \varepsilon \le T_0 \le T^*_0 + \varepsilon\} = \gamma, \quad (1.15)$$

где $T^*_0 - \varepsilon = T^*_{0\,н}$ – нижняя граница доверительного интервала;
$T^*_0 + \varepsilon = T^*_{0\,в}$ – верхняя граница этого интервала.

Таким образом, интервал, в пределах которого заключено неизвестное значение параметра T_0 (математическое ожидание), называется доверительным, а вероятность того, что неизвестное значение T_0 заключено в пределах этого интервала, называется доверительной.

Если $\gamma = 0.9$, то это означает, что в 90% случаев обработки статистических данных неизвестное (истинное) значение параметра T_0 заключено в пределах доверительного интервала ($T_{0\,н}$; $T_{0\,в}$), а в 10% может быть вне его. Отсюда вытекает важное следствие: чем выше доверительная вероятность, тем шире доверительный интервал.

Теперь рассмотрим интервальные оценки для двух наиболее употребительных в инженерной практике законов распределения отказов: экспоненциального и нормального.

1.3.2 Доверительный интервал при экспоненциальном законе распределения отказов. Предположим, что, используя принцип эргодичности проводится эксплуатация одного образца техники весьма продолжительное время, т.е. до получения не менее n отказов. Необходимо найти доверительный интервал ($T^*_{0\,н}$; $T^*_{0\,в}$) для неизвестного параметра T_0, если закон распределения времени возникновения отказов экспоненциальный.

При экспоненциальном законе (внезапные отказы) вероятность наступления l отказов подчиняется закону Пуассона:

$$Q_l(\tau_l) = \frac{(\lambda\tau_l)^l}{l!} e^{-\lambda\tau_l},$$

а вероятность наступления не менее n отказов можно определить как сумму

$$Q_{l>n}(\tau_l) = \sum_{l=n}^{\infty} \frac{(\lambda\tau_l)^l}{l!} e^{-\lambda\tau_l}.$$

Если в этой формуле перейти к новой переменной $\lambda\tau_l = \frac{\tau_l}{T_0}$ или $2\lambda\tau_l = \frac{2\tau_l}{T_0}$ и продифференцировать по этой переменной, то получим плотность вероятности $\frac{dQ(\tau)}{d\tau} = f(\tau)$. Эта плотность вероятности называется

χ^2 – кси квадрат распределением, где $\chi^2 = \frac{2\tau_n}{T_0} = z$. Она имеет вид показанный на рис. 4.

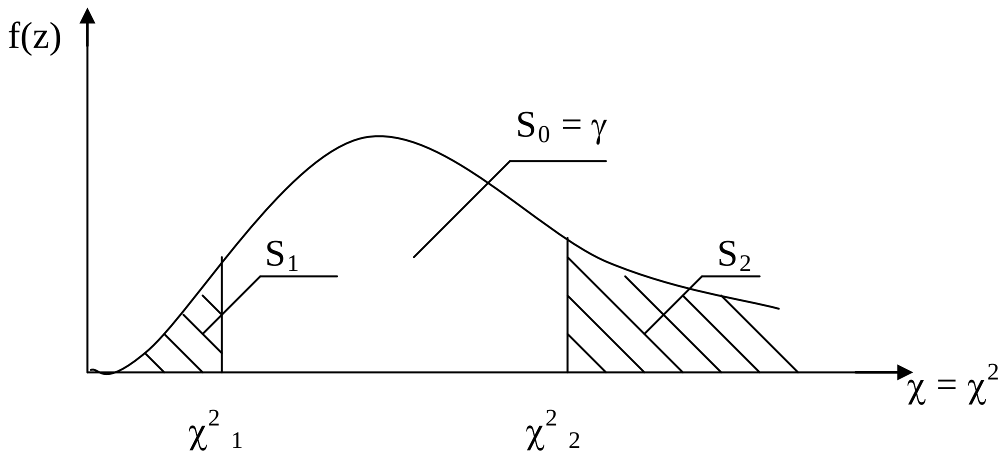

Рисунок 4

Если взять интеграл от этой плотности, то получим

$$\int_0^\infty f(z)dz = 1 \text{ или } \int_{\chi_1^2}^{\chi_2^2} f(z)dz = \gamma,$$

где γ - доверительная вероятность.

Этот интеграл табулирован, имеются математические таблицы:

$$\gamma = P = \{ \chi_1^2 \le \frac{2\tau_n}{T_0} \le \chi_2^2 \} \quad (1.16)$$

Обычно $\chi^2{}_1$, $\chi^2{}_2$ выбирают так, чтобы $S_1 = S_2 = S$ (заштрихованные площади равны). Тогда $S_0 + 2S = 1$ или $S = \frac{1-S_0}{2}$. Но $S_0 = \gamma$, $\gamma = 1- \alpha$, где α - риск допущения ошибки.

Обычно величиной γ в эксплуатации задаются. Например, часто берут $\gamma = 0.9$. Тогда $\alpha = 0.1$.

Условились $\chi^2{}_2$ обозначать как

$$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (S = \frac{1-S_0}{2} = \frac{1-\gamma}{2} = \frac{1-(1-\alpha)}{2} = \frac{\alpha}{2}).$$

Тогда $\chi^2{}_1$ будет $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (S_1 + S_0 = 1 - S_2 = 1 - \frac{\alpha}{2})$.

С учетом новых обозначений можно записать

$$\gamma = P = \{ \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \le \frac{2\tau_n}{T_0} \le \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 \}$$

Решая относительно T_0 неравенства, заключенные в скобках, получим:

$$T_0 \le \frac{2\tau_n}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}}; \quad \frac{2\tau_n}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}} \le T_0$$

откуда окончательно имеем

$$\frac{2\tau_n}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}} \le T_0 \le \frac{2\tau_n}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}} \tag{1.17}$$

где $T^*_{0\,н}$ – нижняя, а $T^*_{0\,в}$ верхняя границы доверительного интервала.

$$T^*_{0\,н} \le T_0 \le T^*_{0\,в} \tag{1.18}$$

Зная γ, определяют α, $\frac{\alpha}{2}$, $1-\frac{\alpha}{2}$ и при к = 2n степеней свободы по таблице значений χ^2 в зависимости от к, $\frac{\alpha}{2}$ или $1-\frac{\alpha}{2}$ находят $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}$, $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}$.

Пример. Автономный источник питания системы СЭС отработал 1830 ч. За это время отмечено 15 отказов. Требуется найти наработку АИП на отказ и доверительные границы при доверительной вероятности $\gamma = 0.8$, если случайное время между отказами распределено по экспоненциальному закону.

Решение

По формуле

$$T_0^* = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tau_i = \frac{1830}{15} = 122 \text{ ч}$$

и формуле $\frac{2\tau_n}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}} \le T_0 \le \frac{2\tau_n}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}}$

определяем доверительные границы:

$$T_{0н}^* = \frac{2\tau_n}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}}; \quad T_{0в}^* = \frac{2\tau_n}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}}$$

Зная, $\gamma = 0.8$, определяем: $\alpha = 1 - \gamma = 1 – 0.8 = 0.2$

$$\frac{\alpha}{2} = 0.1; \; 1-\frac{\alpha}{2} = 0.9$$

и для к = 2, n = 30 степеней свободы (табл. 3 приложения) находим:

$$\chi^2_{\frac{\alpha}{2}} = \chi^2_{0.1} = 40; \qquad \chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}} = \chi^2_{0.9} = 20.$$

Тогда

$$T_{0н}^* = \frac{2\cdot 1830}{40} \approx 91{,}5 \text{ ч};$$

$$T_{0в}^* = \frac{2\cdot 1830}{20} \approx 183 \text{ ч};$$

$$91.5 \le T_0 \le 183$$

Вывод. В 80% случаев ($\gamma = 0.8$) обработка статистических данных о наработке на отказ, истинное значение T_0 заключено в пределах 91,5 и 183 часов; в 20% - лежит вне этого интервала.

1.3.3. Доверительный интервал при нормальном законе распределения отказов.

Пусть требуется оценить $T_{0\,n}$ – надежность оборудования по степенным отказам (например, разрегулеровкам параметров или по отказам, связанным со старением и износом). Закон распределения таких отказов (без дополнительной) проверки считается нормальным.

Доверительная вероятность по определению

$$P\{T^*_{0\,n} - \varepsilon \le T_{0\,n} \le T^*_{0\,n} + \varepsilon\} = \gamma,$$

или

$$P\{T^*_{0\,n\,н} \le T_{0\,n} \le T^*_{0\,n\,в}\} = \gamma. \tag{1.19}$$

В общем виде вероятность попадания среднего значения $T_{0\,n}$ в указанный интервал (из теории вероятностей) определятся с помощью функции Лапласа

$$P\{\alpha \le x \le \beta\} = \Phi\left(\frac{\beta - m_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m_x}{\sigma_x}\right) \tag{1.20}$$

Если в этой формуле положить $m_x = 0$ (перенести начало координат в точку m_x) и приравнять $\alpha = \beta = \varepsilon$, то искомая вероятность будет зависеть только от границ интервала и среднеквадратичного отклонения, т.е.

$$\gamma = P\{T^*_{0\,n} - \varepsilon \le T_{0\,n} \le T^*_{0\,n\,в} + \varepsilon\} = \Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_{T_{0н}}}\right) \tag{1.21}$$

где $\sigma_{T_{0n}} = \dfrac{\sigma}{\sqrt{n}}$ - среднеквадратичное отклонение случайной величины $T^*_{0\,n}$ от $T_{0\,n}$ (математическое ожидание);

σ - среднеквадратичное отклонение случайной величины $T^*_{0\,n}$ (измеренное значение) от $T_{0\,n}$. Значение σ вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T^*_{0ni} - T_{0n})^2}{n-1}}. \tag{1.22}$$

Здесь $T_{0\,n}$ так же как σ, неизвестно.

Обозначим $\dfrac{\varepsilon}{\sigma_{T_{0n}}} = z_\gamma$. Тогда $\varepsilon = z_\gamma$; $\sigma_{T_{0n}} = z_\gamma \dfrac{\sigma}{\sqrt{n}}$ из формулы для нахождения

γ получим

$$T^*_{0n} - Z_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \le T_{0n} \le T^*_{0n} + Z_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \tag{1.23}$$

Задаваясь доверительной вероятностью γ, по математическим таблицам находят Zγ. полученная формула (1.23) не является рабочей, так как неизвестно в ней значение σ. Если вместо σ брать его оценку σ^*, то формула давала бы погрешность. Поэтому в инженерной практике используют распределение Стьюдента, согласно которому

$$T^*_{0n} - \tau_\gamma \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}} \le T_{0n} \le T^*_{0n} + \tau_\gamma \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}} \qquad (1.24)$$

где γ - параметр Стьюдента, определяемый по таб. 4 приложения с учетом γ и k = n-1 степеней свободы.

В этой формуле среднеквадратическое отклонение оценивается из статики:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T^*_{0ni} - T^*_{0n})^2}{n-1}}.$$

Ее можно переписать в виде:

$$T^*_{0\,n} - \varepsilon_\gamma \le T_{0\,n} \le T^*_{0\,n} + \varepsilon_\gamma$$

где

$$\varepsilon_\gamma = \tau_\gamma \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}} = \tau_\gamma \sqrt{\frac{D^*}{n}} = \tau_\gamma \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{0ni} - T^*_{0n})^2}{n(n-1)}}$$

или

$$T^*_{0\,n\,н} = T^*_{0\,n} - \varepsilon_\gamma;\; T^*_{0\,n\,в} = T^*_{0\,n} + \varepsilon_\gamma. \qquad (1.25)$$

Пример. При эксплуатации m_x получены следующие значения времени между разрегулировками его параметров: 51, 67,160, 92, 113, 217, 25, 193 ч. Закон распределения случайного времени между отказами нормальный.

Определить оценку наработки на отказ $T^*_{0\,n}$ и доверительные границы при доверительной вероятности γ = 0.9.

Решение

$$T^*_{0n} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\tau_i}{n} = \frac{51+67+160+92+113+217+25+193}{8} = 114\,ч.$$

С учетом формулы

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T^*_{0ni} - T^*_{0n})^2}{n-1}}$$

находим оценку дисперсии $D^* = \sigma^{*2}$ или

$$\sigma^{*2} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(N_{0ni}^* - N_{0n}^*)^2}{n-1} = D^* = \frac{(51-114)^2 + ... + (193-114)^2}{8-1} = 4790\,ч.$$

По табл. 3 приложения для к = n – 1 = 7 степеней свободы и $\gamma = 0.9$ находим параметр распределения Стьюдента $t\,\gamma = 1.89$ (по табл. 4 приложения) .

По формуле

$$\varepsilon_\gamma = t_\gamma \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}} = t_\gamma \sqrt{\frac{D^*}{n}} = 1.895\sqrt{\frac{4790}{8}} = 46.5$$

по формулам находим

$$T_{0пн}{}^* = T_{0п}{}^* - \varepsilon_\gamma = 67.7 \text{ ч};$$
$$T_{0пв}{}^* = T_{0п}{}^* + \varepsilon_\gamma = 160.7 \text{ ч}.$$

Вывод. В период нормальной эксплуатации ТУ обслуживающему персоналу необходимо проводить настройку (регулировку) параметров в интервале времени наработки 67.74 – 160.7 ч.

1.4. Некоторые законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности.

В теории надежности приходится встречаться со множеством величин, случайных по своей природе. К ним относятся:

- наработка до отказа для однотипных объектов;
- наработка между соседними отказами для восстанавливаемого объекта;
- суммарная наработка объекта до среднего (капитального) ремонта;
- время восстановления ремонтируемых объектов;
- суммарная стоимость ремонтов и др.

Наиболее полно случайная величина может быть охарактеризована законом распределения случайной величины в виде функции распределения $F(t) = P(T < t)$ или плотности распределения (для непрерывной случайной величины)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}.$$

В зависимости от характера самих объектов, условий работы и способов соединения элементов в соответствии с работой (5) имеют место следующие наиболее распространенные законы распределения случайных величин:

- экспоненциальный (показательный) закон;
- закон распределения Вейбулла;
- нормальный закон распределения;
- распределение Пуассона.

Экспоненциальное распределение

Распределение случайной положительной величины называется экспоненциальным, если его плотность распределения вероятности имеет вид

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \ t \geq 0, \qquad (1.26)$$

где λ – параметр распределения, λ > 0.

Характер изменения f(t) для различных λ показан на рис. 5. Из рисунка видно, что чем больше λ, тем быстрее уменьшается во времени f(t).

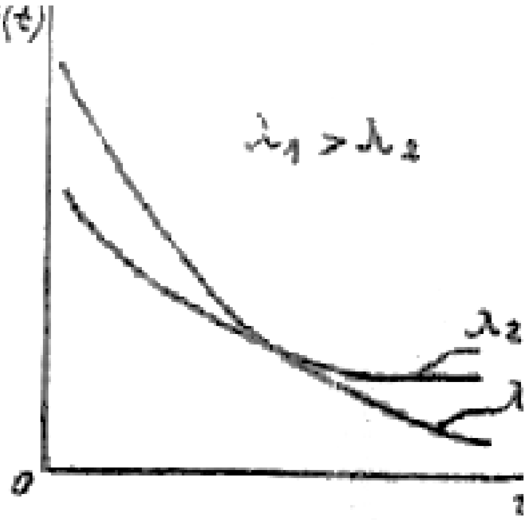

Рисунок 5

Пусть λ(t) = x, тогда $f(t) = \lambda e^{-x}$. Для различных значений x f(t) может быть найдено по табл. 5 приложения, составленной для функции e^{-x}. Математическое ожидание и дисперсию случайной величины, удовлетворяющей уравнению (1.26) , находят по формулам:

$$M(t) = \frac{1}{\lambda}; \qquad (1.27)$$

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{\lambda^2}$$

Экспоненциальное распределение часто используется при рассмотрении внезапных отказов в тех случаях, когда явления износа и старения выражены настолько слабо, что ими можно пренебречь. Наработка до отказа многих невосстанавливаемых элементов радиоэлектронной аппаратуры подчиняется экспоненциальному распределению.

После окончания периода приработки поток отказов у восстанавливаемых объектов часто становится простейшим. В этом случае наработка между соседними отказами имеет экспоненциальное распределение.

В ряде случает в первом приближении принимают, что время восстановления ТУ распределено по экспоненциальному закону.

Распределение Вейбулла.

Случайная положительная величина имеет распределение Вейбулла, если для плотности распределения справедливо уравнение

$$f(t) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{\left(\frac{t}{a}\right)^{b}}, \tag{1.29}$$

где a и b – параметры распределения.

Параметры a и b могут очень сильно менять вид кривой. На рис. 6 показан характер изменения f(t) при изменении b. При b = 1 распределение Вейбулла вырождается в экспоненциальное распределение.

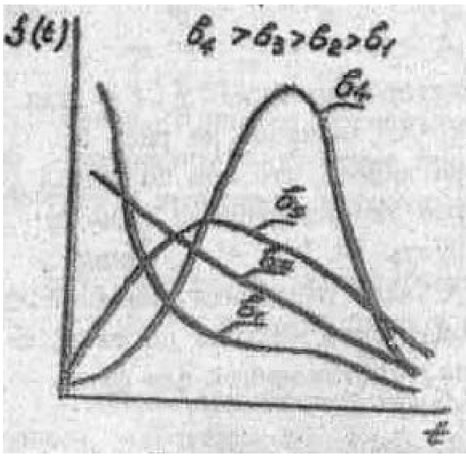

Рисунок 6.

Для математического ожидания и дисперсии случайной величины, удовлетворяющей уравнению (1.29) справедливы формулы:

$$M(t) = a\Gamma(1-\frac{1}{b}), \tag{1.30}$$

$$\sigma^2(t) = a^2[\ \Gamma(1-\frac{1}{b}) - \Gamma^2(1-\frac{1}{b})\ ], \tag{1.31}$$

где $\Gamma(P) = \int_0^\infty x^{P-1} e^{-x}$, а x – табличная гамма – функция (табл. 6 приложения).

Наработка до отказа у многих невосстанавливаемых объектов имеет распределение Вейбулла. К таким объектом относятся, например, подшипники качения, отдельные типы электронных ламп, полупроводниковых приборов, приборы СВЧ, некоторые объекты, у которых отказ наступает вследствие усталостного разрушения.

Нормальное распределение.

Плотность вероятности нормального распределения находят по уравнению:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}; \ t \geq 0, \qquad (1.32)$$

где а и σ – параметры распределения, а > 0, σ > 0, $\frac{\sigma}{a}$ < 0,25.

В общем случае нормально распределенная случайная величина изменяется в интервале

(-∞, ∞), а время t не имеет отрицательного значения, поэтому необходимо выполнение условия

$\frac{\sigma}{a}$ < 0,25. В этом случае практически весь диапазон изменения случайной величины будет иметь положительные значения.

Вид кривой плотности распределения для нормального закона изображен на рис. 7. Из рисунка видно, что этот закон симметричен относительно а и обладает максимальной плотностью в точке t = a.

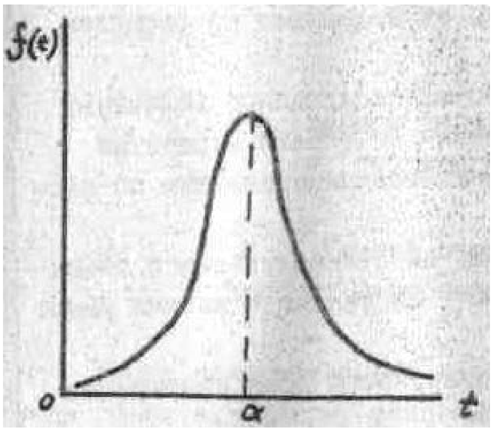

Рисунок 7

Параметры закона a и σ являются его числовыми характеристиками:

$$M(t) = a,$$
$$\sigma^2(t) = a^2.$$

Наработка до отказа невосстанавливаемых объектов иногда приближенна распределена по нормальному закону (Гаусса).

Это характерно для объектов, подверженных старению и износу. Суммарная наработка восстанавливаемого объекта до капитального ремонта и время восстановления ремонтируемых объектов в ряде случаев приближенно распределены по нормальному закону.

Нормальное распределение часто используют для приближенных расчетов в тех случаях, когда имеет место биноминальное распределение или распределение Пуассона.

Распределение Пуассона.

Случайная величина имеет распределение Пуассона тогда, когда вероятность, что она принимает целое положительное значение, находится по формуле

$$P(x_1) = \frac{1}{x_1!} a^{x_i} e^{-a}, \qquad (1.33)$$

где a – параметр распределения, a > 0.

Для математического ожидания и дисперсии имеют место уравнения:

$$M(t) = a, \qquad (1.34)$$
$$\sigma^2(t) = a^2. \qquad (1.35)$$

Распределение Пуассона является частным случаем биноминального распределения, когда число испытаний n достаточно велико, а вероятность наступления события A в одном испытании достаточно мала (P < 0,1). Этот закон называют еще «редких событий» из – за малости P.

При больших значениях α функцию распределения для закона Пуассона можно приближенно заменить функцией нормального распределения с числовыми характеристиками, вычисленными по формулам (1.34) и (1.35).

Закону Пуассона подчиняются следующие случайные величины:

- число отказов элементов за время t, если наработка до отказа у каждого из однотипных элементов распределена по экспоненциальному закону;
- число отказов за время t для восстанавливаемого объекта, у которого промежутки времени между соседними отказами имеют экспоненциальное распределение;
- число дефектных изделий в выборке, если доля дефектных изделий q < 0,1 и др.

2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

2.1. Расчет показателей надежности простых невосстанавливаемых объектов

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида объекта, поэтому основные показатели надежности отдельных объектов можно разбить на две группы:

- показатели, характеризующие надежность невосстанавливаемых объектов;
- показатели, характеризующие надежность восстанавливаемых объектов.

Невосстанавливаемые объекты могут иметь только один отказ. Эти объекты в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта, и если происходит отказ такого объекта, то выполняемая операция считается сорванной. При совместном рассмотрении множества однотипных объектов время работы любого объекта до наступления 1 – го отказа T_0 (наработка до отказа) будет являться величиной случайной, наиболее полно характеризуемой законом распределения этой случайной величины.

Закон распределения случайной величины может быть представлен либо в виде плотности распределения f(t), либо в виде функции распределения F(t).

Свойствами плотности распределения случайной величины являются:

$$f(t) \geq 0, \quad \int_0^{\infty} f(t)dt = 1.$$

Нижний предел интегрирования взят равным 0, т.к. наработа до отказа не имеет отрицательных значений.

Функция распределения наработки до первого отказа определяется по формуле:

$$F(t) = P(T_0 < t) = \int_0^t f(t)dt, \tag{2.1}$$

где F(t) – вероятность попадания значений случайной величины на интервал (0,t)

Если $t_2 < t_1$, то $F(t_2) \geq F(t_1)$. Кроме того, $0 \leq F(t) \leq 1$.

Плотность распределения f(t) связана с функцией распределения следующим соотношением:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \tag{2.2}$$

Статистическая плотность распределения $f^*(t)$ может быть найдена по формуле

$$f^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \qquad (2.3)$$

где $n(\Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале $(t, t + \Delta t)$;

N_0 – число объектов, исправных в начальный момент времени;

N – общее число испытываемых объектов.

Основными показателями надежности для невосстанавливаемых объектов является следующие:

- вероятность безотказной работы – P(t);
- средняя наработка до отказа – $t_{ср}$;
- интенсивность отказов – $\lambda(t)$.

Эти показатели являются «единичными» показателями надежности, так как характеризуют только одно из свойств, входящих в понятие надежности, - безотказность.

Перечисленные показатели надежности могут быть найдены либо по известному закону распределения наработки до отказа, либо приближенно опытным путем по результатам испытаний однородных объектов на надежность.

1. Вероятность безотказной работы за время наработки до отказа t:

$$P(t) = P(T > t) = P(t < T < \infty) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \qquad (2.4)$$

Учитывая, что

$$F(t) = P(T < t) = 1 - P(T > t) = 1 - P(t), \qquad (2.5)$$

имеем:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} = -P'(t). \qquad (2.6)$$

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оцениваются выражением

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \qquad (2.7)$$

где N_0 – общее число испытываемых объектов;

$n(t)$ – число объектов, отказавших за время t.

При $N_0 \to \infty$, $P^*(t) = P(t)$, т.е. при увеличении числа испытываемых объектов статистическая оценка практически совпадает с вероятностью безотказной работы P(t).

2. Средняя наработка до отказа определяется как математическое ожидание до отказа:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} tf(t)dt, \qquad (2.8)$$

где f(t) – плотность распределения наработки до отказа, математические выражения, для которой приведены в п.1.4.

Установим связь между P(t) и t_{cp}.

С учетом выражения (2.6) формула (2.8) имеет вид

$$t_{cp} = -\int_0^{\infty} tP'(t)dt.$$

Взяв интеграл по частям, с учетом того, что P(0) = 1, а P(∞) = 0, получим:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt, \qquad (2.9)$$

Геометрически t_{cp} соответствует площади, ограниченной сверху кривой P(t). Если кривая P(t) построена по опытным данным, то путем замера площади можно найти приближенно t_{cp}.

По статистическим данным об отказах средняя наработка до отказа вычисляется по формуле

$$t^*_{cp} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \qquad (2.10)$$

где t_i – наработка до отказа i-го объекта. Здесь подразумевается план испытаний по времени до наступления отказа у последнего объекта.

3. Интенсивность отказов в соответствии с ее определением находят по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \qquad (2.11)$$

или с учетом выражения (2.6)

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)} = -[\ln P(t)]. \qquad (2.12)$$

Проинтегрируем выражение (2.12) в пределах от 0 до t:

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\int_0^t [\ln P(t)]'dt$$

или

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t).$$

Окончательно имеем

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{2.13}$$

Полученная зависимость (2.13) справедлива для любого закона распределения наработки до отказа.

Статистическая интенсивность отказов определяется по формуле

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{2.14}$$

где $n(\Delta t)$ – число объектов, отказавших в промежутке времени $(t, t + \Delta t)$;

$N(t) = N_0 - n(t)$ – число объектов, наработка до отказа которых превышает t ;

$n(t)$ – число отказавших объектов за период t.

Определим для некоторых законов распределения показатели безотказности.

Для экспоненциального закона распределения наработки до отказа имеем:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \tag{2.15}$$

$$t_{ср} = \frac{1}{\lambda}; \tag{2.16}$$

$$\lambda(t) = \lambda\ . \tag{2.17}$$

В случае нормального закона распределения наработки до отказа имеем

где $F_0(\frac{t-a}{\sigma}) = F_0(z) = \frac{1}{2\pi}\int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}}dz$ – функция нормального распределения для нормированной и центрированной случайной величины $z = \frac{t-a}{\sigma}$, для которой составлены таблицы (табл. 3 приложения, где z = x).

Для $F_0(z)$ справедливо отношение

$$F_0(-z) = 1 - F_0(z).$$

Тогда

$$P(t) = F_0(\frac{a-t}{\sigma}); \tag{2.19}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma}\cdot\frac{f_0(\frac{a-t}{\sigma})}{F_0(\frac{a-t}{\sigma})}, \tag{2.20}$$

где $f_0(z) = \frac{1}{2\pi}e^{-\frac{z^2}{2}}$; $z = \frac{t-a}{\sigma}$.

Для $f_0(z)$ справедливо следующее соотношение:

$$f_0(-z) = 1 - f_0(z).$$

Тогда

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{f_0(\frac{a-t}{\sigma})}{F_0(\frac{a-t}{\sigma})^2} = \frac{1}{\sigma} \cdot f_1(\frac{a-t}{\sigma}) \ . \qquad (2.21)$$

Функция $f_1(x)$ табулирована (табл. 7 приложения).

Рассмотренные показатели надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых объектов, а также и восстанавливаемых при их работе до первого отказа. Наличие нескольких показателей вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность объектов по всем показателям.

Интенсивность отказов - наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет достаточно просто вычислять количественные характеристики сложной системы.

2.2. Расчет показателей надежности восстанавливаемых объектов

Функционирование восстанавливаемых объектов отличается от функционирования невосстанавливаемых объектов тем, что при возникновении отказов у восстанавливаемых объектов они не снимаются с эксплуатации, а ремонтируются или заменяются новыми и снова продолжат функционировать. При этом каждый объект может иметь много отказов.

Если время, затрачиваемое на восстановление работоспособности объекта, мало по сравнению со временем работы объекта, то им можно пренебречь в считать восстановление мгновенным.

Моменты отказов, следующие один за другим в случайные моменты времени, образуют поток случайных событий называемый потоком отказов.

Основными показателями безотказности восстанавливаемых объектов в соответствии с работой [6] являются следующие:

- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- наработка на отказ T_o ;
- вероятность безотказной работы $P(t)$.

В качестве характеристики потока отказов используется "ведущая функция" $\Omega(t)$ для данного потока.

Пусть $z(t)$ – случайное число отказов за время t.

Тогда

$$\Omega(t) = M[z(t)], \tag{2.22}$$

т, е. ведущая функция есть математическое ожидание числа отказов за время t.

Например, при экспоненциальном законе распределения наработки между отказами

$$\Omega(t) = \lambda \cdot t$$

где λ – параметр распределения.

Математическое ожидание числа отказов за интервал времени (t_1, t_2) определяется по формуле

$$M[z(t_1, t_2)] = \Omega(t_1) - \Omega(t_2) . \tag{2.23}$$

где $z(t_1, t_2)$ – случайное число отказов за интервал (t_1, t_2).

Функция

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Omega(t+\Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} = \frac{d\Omega(t)}{dt} \tag{2.24}$$

называется параметром потока отказов.

Для ординарных потоков без последействия параметр потока отказов связан с ведущей функцией соотношением

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t)dt.$$

Приближенное значение параметра потока отказов находят из выражения

$$\omega^*(t) = \frac{\sum_1^N m_i(t+\Delta t) - \sum_1^N m_i(t)}{N \cdot \Delta t}. \qquad (2.26)$$

Из формулы (2.26) следует, что параметр потока отказов – это среднее число отказов в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ и плотность распределения $f(t)$ для ординарных потоков с ограниченным последействием связаны интегральным уравнением вида

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) \cdot f(t-\tau)d\tau. \qquad (2.27)$$

По известной плотности распределения $f(t)$ можно найти все количественные характеристики надежности невосстанавливаемых объектов, поэтому уравнение (2.27) является уравнением основным.

Независимо от вида функции $f(t)$ параметр потока отказов при $t \to \infty$ стремится к $\frac{1}{t_{ср}}$. Это значит, что при длительной эксплуатации восстанавливаемого объекта поток его отказов независимо от закона распределения времени безотказной работы становится стационарным. При этом $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$.

Наработку на отказ в соответствии с определением (4) находят по формуле

$$T_0 = \frac{t}{\Omega(t)}, \qquad (2.28)$$

где t - период наработки;

Ω (t) – математическое ожидание числа отказов за период наработки t.

Если рассматривается период времени от t_1 до t_2 , то

$$T_0 = \frac{t_2 - t_1}{\Omega(t_2) - \Omega(t_1)}. \qquad (2.29)$$

После периода приработки из уравнения (2.29) получаем

$$T_0 = \frac{1}{\omega} = const. \qquad (2.30)$$

Наработка на отказ есть среднее время между соседними отказами.

Величина наработки ан отказ в общем случае зависит от длительности периода, в течение которого она определяется. Это обусловлено непостоянством характеристики потока отказов Ω(t).

Наработка на отказ статистически определяется отношением суммарной наработки восстанавливаемых объектов к суммарному числу отказов этих объектов.

Пусть испытывается N восстанавливаемых объектов до появления у каждого из них n отказов. При этом t_i – суммарная наработка i – го объекта за время этих испытаний. Тогда

$$T_0^{\ *} = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N \cdot r}. \qquad (2.31)$$

Вероятность безотказной работы объекта за время наработки находят как вероятность того, что за это время не наступит ни одного отказа:

$$P(t) = e^{-\Omega(t)}. \qquad (2.32)$$

Вероятность безотказной работы в период между наработками t находят по уравнению

$$P(t_2 - t_1) = e^{-(\Omega(t_2) - \Omega(t_1))} = e^{-\int_{e_1}^{t_2} \omega(t)dt}. \qquad (2.33)$$

После периода приработки вероятность безотказной работы в интервале t_1, t_2 находят по уравнению

$$P(t_2 - t_1) = e^{-\omega(t_2 - t_1)} = e^{-\frac{t_2 - t_1}{T_0}}. \qquad (2.34)$$

Более точные формулы для P(t) и Ω(t) можно получить, зная закон распределения f(t).

Рассмотрим показатели ремонтопригодности восстанавливаемых объектов.

Вероятность восстановления в заданное время согласно определению находят:

$$P_в(t) = P(t_в < t) = F_в(t) \quad , \qquad (2.35)$$

где $t_в$ – случайное время восстановления;

$F_в(t)$ – функция распределения времени восстановления.

Время восстановления – это время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа.

По аналогии с выражением (2.14) поток восстановлений можно характеризовать интенсивностью восстановлений μ(t).

$$\mu(t) = \frac{f_в(t)}{1 - P_в(t)}, \qquad (2.36)$$

где $f_в(t)$ – плотность распределения времени восстановления.

При любом законе распределения времени восстановления $P_в(t)$ и μ(t) связаны между собой зависимостью:

$$P_в(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu t_д dt}. \qquad (2.37)$$

При показательном законе времени восстановления μ(t) = μ, а

$$P_в(t) = 1 - e^{-\mu e}. \qquad (2.38)$$

Согласно определению среднее время восстановления $T_в$ находят:

$$T_в = \int_0^\infty t f_в(t) dt. \qquad (2.39)$$

При показательном законе времени восстановления

$$T_в = \int_0^\infty t\mu e^{\mu t} dt = \frac{1}{\mu}. \qquad (2.40)$$

Если на отыскание и устранение m отказов было затрачено время t_1, t_2, …, t_1, то среднее время восстановления находят по уравнению

$$T^*_в = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} t_i , \qquad (2.41)$$

где T^*_0 – это статистическая оценка времени восстановления.

2.3. Расчет показателей надежности сложных не резервированных технических устройств.

Рассмотрим невосстанавливаемую не резервированную техническую систему как сложный объект. Структурная схема надежности такой системы представляет собой цепочку последовательно соединенных элементов. Отказ любого отдельного элемента приводит к отказу всей системы. Будем считать отказы отдельных элементов независимыми событиями.

Пусть система состоит из N отдельных элементов.

Событие A_i – безотказная работа i – го отдельного элемента i = 1,2, …,N.

Событие B_i – безотказная работа системы. Система будет безотказно работать тогда, когда одновременно будут функционировать все отдельные элементы, т.е.

$$B = A_1 \cdot A_2 \cdot \ldots \cdot A_N = \prod_{i=1}^{N} A_i ,$$

для независимых событий

$$P(B) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \ldots \cdot P(A_N) = \prod_{i=1}^{N} P_i(A_1).$$

Окончательно имеем

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \ldots \cdot P_N(t) = \prod_{i=1}^{N} P_i(t), \qquad (2.42)$$

где P(t) – вероятность безотказной работы системы;

$P_1(t)$, $P_2(t)$, …, $P_n(t)$ – вероятности работы отдельных элементов (объектов).

В частном случае при одинаковой надежности элементов, т.е. $P_1(t) = P_2(t) = \ldots = P_N(t)$ вероятность безотказной работы системы определяется как

$$P(t) = \{P_i(t)\}^N . \tag{2.43}$$

Из формул (2.42) и (2.43) видно, что при последовательном соединении элементов вероятность безотказной работы системы уменьшается с ростом числа элементов N.

Найдем интенсивность отказов системы λ(t) через интенсивность отказов ее элементов $\lambda_i(t)$.

В соответствии с формулами (2.13) и (2.42) имеем

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} P_i(t) = \prod_{i=1}^{N} e^{-\int_0^t \lambda_i(t)dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(t)dt} . \tag{2.44}$$

С другой стороны

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} . \tag{2.45}$$

Приравняв равные части уравнений (2.44) и (2.45), получим:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(t) . \tag{2.46}$$

Таким образом, интенсивность отказов системы равна сумме интенсивности отказов ее элементов.

Среднюю наработку до отказа системы найдем по формуле (2.9) с учетом уравнения (2.42):

$$t_{cp} = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \ldots \cdot P_N(t)dt . \tag{2.47}$$

В ряде случаев интеграл от функции (2.47) для t_{cp} не выражается через элементарные или табулированные функции. В этом случае для нахождения t_{cp} применяют метод численного интегрирования.

При расчете показателей надежности не резервированной системы важное место имеет учет зависимости между отказами. Зависимость между отказами связана с воздействием на систему внешних условий, способствующих выходу из строя сразу нескольких элементов. Примерами воздействия внешних условий являются:

- отклонение температурного режима от нормы;
- тряска, вибрации;
- скачки напряжения в цепи электропитания всей схемы;
- повышенное время хранения изделия и т.п.

Все эти воздействия нужно учитывать при расчете показателей надежности системы. Учет этой зависимости сводится к следующему.

Пусть имеется система, состоящая из какого – либо числа элементов. Предположим, что система может работать в одном из К режимов R_1, R_2, …, $R_к$ с вероятностями $P(R_1)$, $P(R_2)$, …,$P(R_к)$. Считаем, что в режиме R_i

известны показатели надежности элементов системы, при этом отказы элементов в этом режиме независимы.

Тогда по формуле полной вероятности можно найти полную вероятность безотказной работы системы:

$$P_c = \sum_{i=1}^{k} P(R_i) P(A/R_i), \tag{2.48}$$

где $P(A/R_i)$ – условная вероятность безотказной работы системы, вычисленная при условии ее работы в режиме R_i.

Таким образом, полный показатель системы равен сумме вероятностей различных режимов работы, умноженные на условные показатели надежности системы, вычисленные для этих режимов.

<u>Пример</u>. Система состоит из трех последовательно включенных элементов, которая работает в двух режимах: нормальном и ненормальном. Вероятности этих режимов равны: $P(R_1) = 0.7$, $P(R_2) = 0.3$.

В первом режиме вероятности безотказной работы элементов равны:

$P_1 = 0.95$; $P_2 = 0.92$; $P_3 = 0.80$.

Для второго режима эти вероятности равны:

$P_1 = 0.80$; $P_2 = 0.75$; $P_3 = 0.62$.

Определить полную вероятность безотказной работы системы P_c.

Решение. Определяем вероятности безотказной работы системы для первого и второго режимов:

$$P(A/R_1) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 0.95 \cdot 0.92 \cdot 0.80 = 0.699,$$

$$P(A/R_2) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 0.80 \cdot 0.75 \cdot 0.62 = 0.372.$$

Полная вероятность P_c равна:

$$P_c = \sum_{i=1}^{2} P(R_i) \cdot P(A/R_i) = 0.7 \cdot 0.699 + 0.3 \cdot 0.372 = 0.601.$$

Для сравнения определим P_c, считая отказы элементов независимыми.

Полные вероятности безотказной работы элементов соответственно равны:

$$P_{1п} = 0.7 \cdot 0.95 + 0.3 \cdot 0.80 = 0.905;$$
$$P_{2п} = 0.7 \cdot 0.92 + 0.3 \cdot 0.75 = 0.869;$$
$$P_{3п} = 0.7 \cdot 0.80 + 0.3 \cdot 0.62 = 0.746.$$

Тогда P_c равна: $P_{1п} \cdot P_{2п} \cdot P_{3п} = 0.905 \cdot 0.869 \cdot 0.746 = 0.587$.

Из проведенных вычислений видно, что для не резервированной системы без учета зависимости отказов значение P_c является заниженным по сравнению со значением P_c, найденном при учете зависимости отказов. Отмеченное обстоятельство оказывается справедливым для всех не резервированных систем. И это занижение тем больше, чем больше число элементов, входящих в состав системы.

2.4. Расчет показателей надежности резервированных технических устройств.

Будем рассматривать системы, имеющие структурное резервирование, т. е. такие системы, для которых часть элементов является избыточной по отношению к минимальной функциональной структуре системы, необходимой и достаточной для выполнения ею заданных функций.

Расчетные формулы для общего резервирования с постоянно включенным резервом и с целой кратностью.

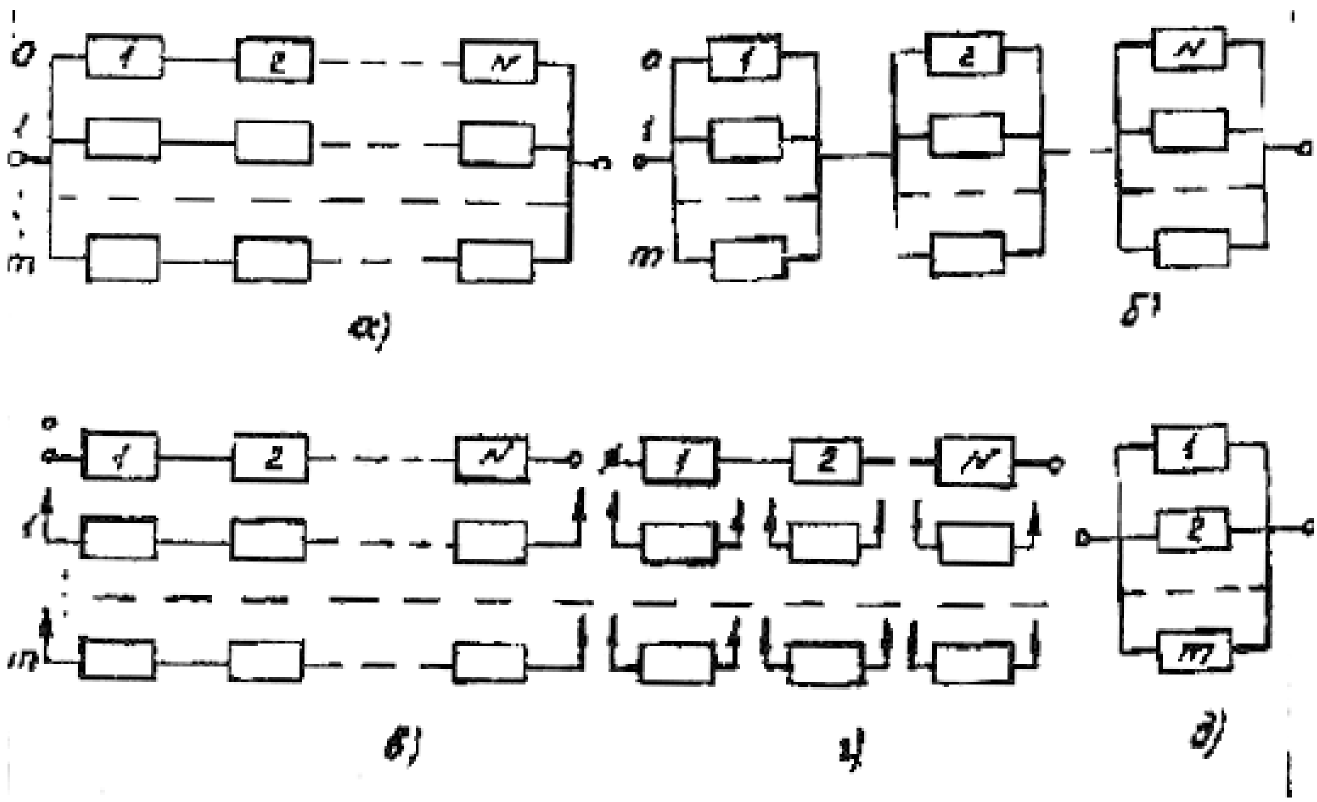

Рисунок 8

Структурная схема надежности такой системы изображена на рис.8,а Примем обозначение: m-число резервных цепей (кратность резервирования); N- число элементов в основной или любой резервированной цепи; P_i (t)-вероятность безотказной работы i-го элемента в течении времени t.

Вероятность безотказной работы любой из m+1 цепей можно найти по формуле (2.42). Общее число цепей в системе m+1 (m – резервных и одна основная). Тогда вероятность P(t) безотказной работы системы в течении времени t можно найти по формуле вероятности наступления хотя бы одного из m+1 случайных событий, т.е.

$$P(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^{N} P_i(t)^{m+1}] \; . \qquad (2.49)$$

При экспоненциальном законе распределения наработки

$$P_i(t) = e^{-\lambda it},$$

где λ_i – интенсивность отказов i-го элемента.

Тогда

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}; \qquad (2.50)$$

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=1}^{m+1} \frac{1}{j} = t_{cp_0} \sum_{j=1}^{m+1} \frac{1}{j} \; , \qquad (2.51)$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$ - интенсивность отказов нерезервированной системы или любой из m резервных систем;

$t_{ср0}$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы или любой из m резервных цепей;

$t_{ср}$ – средняя наработка до отказа резервированной системы.

Могут быть случаи, когда система резервируются неравнонадежными системами (цепями). Пусть $P_{0j}(t)$ – вероятность безотказной работы j-й цепи . Тогда

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} \{1 - P_{0j}(t)\}. \qquad (2.52)$$

Значение $P_{0j}(t)$ находят по формуле (2.42).

Расчетные формулы для раздельного резервирования с постоянно включенным резервом и с целой кратностью.

Структурная схема надежности такой системы изображена на рис.8,б:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} \{1 - [1 - P_i(t)]^{m_{i+1}}\}, \qquad (2.53)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента;

m_i – кратность резервирования i-го элемента;

N – число элементов основной системы.

При экспоненциальном законе распределения наработки каждого из элементов, когда $P_i(t) = e^{-\lambda it}$, получим

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} \{1 - [1 - e^{-\lambda i(t)}]^{mi+1}\}. \qquad (2.54)$$

При равнонадежных элементах и одинаковой кратности их резервирования, т.е. когда

$$P_1(t) = P_2(t) = ... = P_N(t) = e^{-\lambda t}; m_1 = m_2 = ... = m_N$$

получим

$$P(t) = \{1-[1-e^{-\lambda t}]^{m+1}\}^N \qquad (2.55)$$

$$t_{cp} = \int_0^\infty P(t)\partial t = \frac{(N-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{\nu_i(\nu_i+1)...(\nu_i+N-1)}, \qquad (2.56)$$

где $\nu_i = \dfrac{i+1}{m+1}$.

Расчетные формулы для общего резервирования замещением с целой кратностью.

Для случая, приведенного на рис.8,в, имеем:

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) f_m(\tau) d\tau \quad , \qquad (2.57)$$

где $P_{m+1}(t), P_m(t)$ -вероятности безотказной работы резервированной системы кратности m+1 и m соответственно;

$P(t-\tau)$ - вероятность безотказной работы основной системы в течение времени (t-τ);

$f_m(\tau)$ - плотность вероятности отказов резервированной системы кратности m в момент времени τ.

Рекуррентная формула (2.57) позволяет получить соотношения для систем с любой кратностью резервирования . Для этого необходимо вместо P(t-τ) и $f_m(\tau)$ поставить их значения в соответствии с установленным законом распределения и взять интеграл в правой части формулы. При этом надо учитывать и состояние резерва (нагруженный, облегченный, ненагруженный).

При нагруженном состоянии резерва расчетные формулы для P(t) и tср совпадают с формулами (2.50) и (2.51) в случае экспоненциального закона, потому что нагруженный резерв можно рассматривать как постоянно включенный резерв.

При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа системы и ненагруженном состоянии резерва

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} \quad ; \qquad (2.58)$$

$$t_{cp} = t_{cp0}(m+1) \ , \qquad (2.59)$$

где λ_0 - интенсивность отказов нерезервированной системы или любой из m резервных цепей;

$t_{cp0} = \dfrac{1}{\lambda_0}$ - средняя наработка до отказа нерезервированной системы или любой из m резервных цепей;

m – кратность резервирования (число резервных цепей).

При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа системы и облегченном состоянии резерва

$$P(t) = e^{-\lambda 0t}(1+\sum_{i=1}^{m+1}\frac{a_i}{i!}(1-e^{-\lambda it})^i) \quad ; \qquad (2.60)$$

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_0}\sum_{i=0}^{m}\frac{1}{1+i_k} \quad , \qquad (2.61)$$

где $a_i = \prod_{i=0}^{i-1}(\gamma + \frac{\lambda_0}{\lambda_i})$, $k = \frac{\lambda_i}{\lambda_0}$;

λ_i - интенсивность отказов резервной системы, находящейся в облегченном резерве;

λ_0 - интенсивность отказов нерезервированной системы.

Раздельное резервирование замещением с целой кратностью

Для случая , приведенного на рис.8,г, имеем:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} P_i(t) \quad , \qquad (2.62)$$

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы для элемента i-го типа, резервированного замещением (формулы (2.57), (2.58), (2.60)).

<u>Расчетные формулы общего резервирования с дробной кратностью и постоянно включенным резервом</u>

Рассмотрим случай, приведенный на рис.8,д. Пусть резервированная система состоит из цепей, причем число основных цепей равно h. Тогда число резервных цепей l-h, а кратность резервирования $m = \dfrac{l-h}{h}$.

Система будет работать безотказно в том случае, если будут безотказно работать не менее чем h цепей. Это равносильно тому, что откажут не более чем l-h цепей. Для независимых отказов вероятность безотказной работы системы находят по формуле полной вероятности, в которой вероятности гипотез находят по биноминальному распределению

$$P(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i \left[P_0(t)\right]^{l-i} \left[1 - P_0(t)\right]^i , \qquad (2.63)$$

где $C_l^i = \dfrac{l!}{i!(l-i)!}$ - число сочетаний из l по i;

$P_0(t)$ - вероятность безотказной работы любой основной или резервной цепи.

Так как

$$\left[1 - P_0(t)\right]^i = \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^l \left[P_0(t)\right]^j , \text{ то}$$

$$P(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i \left[P_0(t)\right]^{l-i} \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^j \left[P_0(t)\right]^j . \qquad (2.64)$$

Для экспоненциального распределения наработки до отказа любой из цепей справедливо отношение

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i} , \qquad (2.65)$$

где λ_0 - интенсивность отказов одной цепи.

Формулы (2.63)-(2.65) справедливы и для случая, если каждая из цепей будет состоять только из одного элемента. В этом случае $P_0(t)$ и λ_0 нужно рассматривать как показатели надежности не цепи, а одного элемента.

Пример. Найти вероятность безотказной работы системы, структурная схема надежности которой изображена на рис.9. Система состоит из двух неравнонадежных устройств I и II. Устройство I состоит из четырех узлов *а, б, в* и *г*. Узел *а* дублирован с постоянно включенным резервом, причем каждая часть узла состоит из трех последовательно соединенных элементов. Узел *б* дублирован по способу замещения , узел *в* состоит из одного нерезервированного элемента, а узел *г* имеет постоянное резервирование с дробной кратностью m=1/2 (схема группирования).

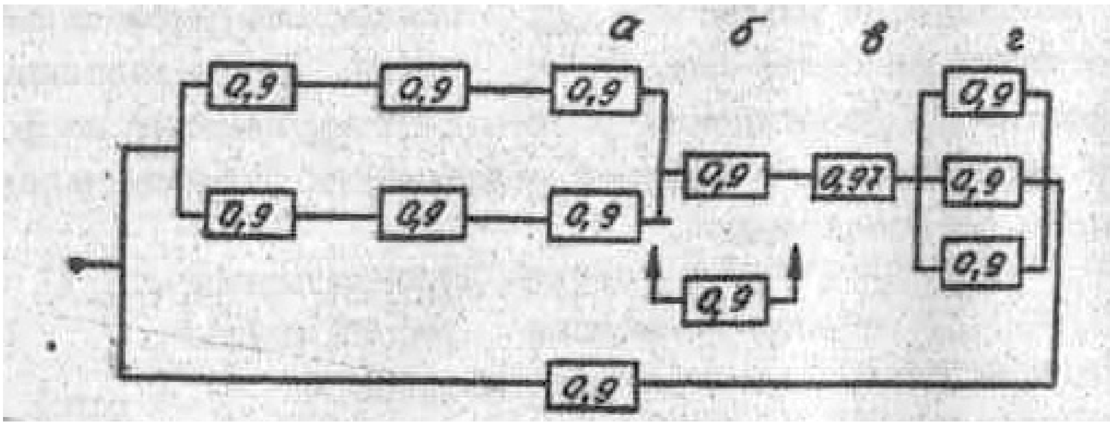

Рисунок 9

Устройство II является нерезервированным. Вероятности безотказной работы элементов устройства известны и их значения указаны на рисунке.

Решение. Так как оба устройства неравнонадежны, то на основании формулы (2.52) имеем

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{2} [1 - P_{0y}(t)] = 1 - [1 - P_I(t)][1 - P_{II}(t)] .$$

Найдем вероятность $P_I(t)$. Так как все узлы устройства I соединены последовательно, то вероятность безотказной работы устройства I в соответствии с формулой (2.42) равна произведению вероятности безотказной работы всех узлов, т.е.

$$P_I = P_а \cdot P_б \cdot P_в \cdot P_г \ .$$

Узел α имеет общее постоянное резервирование с кратностью m=1 , а число элементов в каждой цепи n=3. Тогда на основании формулы (2.49)

$$P_\alpha = 1 - [1 - \prod_{i=1}^{n} P(t)_i]^{m+1} = 1 - [1 - 0.9^3]^2 = 0.93 .$$

Узел б имеет резервирование замещением с ненагруженным резервом и m+1. Тогда на основании формулы (2.58) имеем

$$P_б = e^{-\lambda 0t} \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda 0t}(1 - \lambda_0 t) = 0.9(1 + 0.1) = 0.99 \ ,$$

где $e^{-\lambda 0t} = 0.9$ - вероятность безотказной работы одного элемента , а $e^{-\lambda 0t} = 1 - \lambda_0 t = 0.9; \lambda_0 t = 1 - 0.9 = 0.1$.

Заметим, что формула (2.58) справедлива для экспоненциального закона распределения наработки до отказа.

Узел г имеет общее число систем l=3 , а число систем, необходимых для нормальной работы h=2, т.е. здесь применено постоянное резервирование с дробной кратностью. Тогда на основании формулы (2.63)

$$P_k = \sum_{i=0}^{l-h} c_j^i [P_0(t)]^{l-i} [1 - P_0(t)]^i = \sum_{i=0}^{1} c_3^i 0.9^{3-i} 0.1^i = 0.9^3 + 3 \cdot 0.9^2 \cdot 0.1^1 = 0.972 .$$

Вероятность безотказной работы устройства I равна

$$P_I = P_a \cdot P_{\bar{0}} \cdot P_в \cdot P_г = 0.93 \cdot 0.99 \cdot 0.97 \cdot 0.972 = 0.868 \ .$$

Тогда вероятность безотказной работы всей резервированной системы будет

$$P(t) = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}) = 1 - (1 - 0.868)(1 - 0.9) = 0.987 .$$

2.5. Расчет комплексных показателей надежности

Для оценки комплексных показателей надежности объекта необходимо формализовать процесс его функционирования во взаимодействии со средой, выбрать или разработать соответствующую структуре, характеру и условиям функционирования объекта математическую модель надежности.

Выбор модели для оценки надежности объекта почти всегда определит систему показателей(показатель) для оценки надежности объекта. Выбор модели надежности объекта определяется следующими основными факторами:

- структурой объекта, т.е. его составом и характером связей между составляющими его элементами;
- состоянием объекта, характером и условиями его функционирования;
- характером и условиями возникновения отказов объекта (законом распределения времени наработки);
- стратегией восстановления и структурой ремонтных органов.

<u>Структура объекта</u>. Объект может быть простым или сложным. Простым называется объект, который при оценке надежности рассматривается как единое целое.

Простой объект может являться элементом сложного объекта (системы) , либо иметь самостоятельное эксплутационное значение.

Объект, состоящий из n (n>1) одновременно функционирующих объектов (элементов), рассматривается как сложный. По характеру функционального взаимодействия элементов сложного объекта их соединение может быть основным (последовательным), резервным (параллельным) и смешанным.

<u>Состояние объекта.</u> Объект, надежность которого подлежит оценке, может находится либо в состоянии функционирования по назначению, либо в состоянии дежурного режима работы, либо в стадии сохранения (на складе или на консервации), либо транспортирования и т.п.

Функционирование по назначению может протекать в различных режимах и условиях.

Характер отказов объекта. Отказ объекта может наступать в результате отказа одного его элемента или определенного числа его элементов. Отказы элементов сложного объекта могут быть зависимыми и независимыми.

Отказ одного элемента (некоторого числа элементов) может не вызывать отказа остальных элементов сложного объекта.

Интенсивность отказов элементов сложного объекта может быть неубывающей функцией времени либо произвольной функцией. Отказ может быть явным либо неявным. Он может быть выявлен сразу либо по истечении некоторого времени.

Стратегия восстановления. Восстановление объекта может быть полное и неполное. Восстановление объекта будет полным, если все характеристики надежности восстанавливаемого объекта будут иметь значения не менее, чем указанные в технической документации на объект проектные значения. В противном случае восстановление будет неполным. Восстановление объекта может быть мгновенным (практически мгновенным) $T_в << T_э$ и немгновенным. В последнем случае время восстановления может быть случайным и неслучайным (регулярным). Восстановительные органы, обслуживающие рассматриваемый объект, могут иметь различную структуру и порядок функционирования. Обычно работу этих органов рассматривают как систему массового обслуживания.

Для поддержания работоспособного состояния объекта предусмотрено комплексное техническое обслуживание системы. Техническое обслуживание может также проводиться и в ходе устранения выявленного отказа объекта.

В состоянии сохраняемости либо в состоянии дежурного режима функционирования объект может проверяться периодически на работоспособность в течение определенного времени.

Время восстановления объекта, в зависимости от характера отказа или структуры восстановительных органов, определяется как сумма интервалов времени, затрачиваемого на проведение восстановительных операций (в том числе интервала времени между возникновением отказа и моментом его выявления).

Все перечисленные здесь, а также и другие важные факторы должны быть учтены при выборе или при разработке модели надежности объекта [8].

К комплексным показателям надежности восстонавливаемых объектов относятся:

- Коэффициент оперативной готовности;
- Коэффициент готовности;
- Коэффициент технического использования.

Обычно оцениваются стационарные (предельные) значения этих показателей.

Рассмотрим модели, формулы и порядок расчета комплексных показателей для некоторых наиболее часто встречающихся в практике способов и условий эксплуатации объектов НГК

Для расчета комплексных показателей введем следующие обозначения:

t – наработка восстанавливаемого объекта до отказа;

$t_{ср}$ – средняя наработка объекта до отказа;

$t_в$ – средняя продолжительность восстановления работоспособности объекта (это время может включать в себя в виде слагаемого среднее время от момента возникновения до момента его появления $t_и$);

σ^2 – дисперсия наработки объекта до отказа;

λ - интенсивность отказов, соответствующая принятому для аппроксимации реального закона гамма-распределения;

m – целое число, ближайшее к величине $\frac{t_{ср}^2}{\sigma^2}$, это число используется при замене фактического распределения наработки до отказа соответствующим гамма-распределением;

τ - продолжительность выполнения задачи (время, необходимое для выполнения задачи);

T – наработка объекта;

t_0 – средняя продолжительность технического обслуживания объекта;

$T_{пр}$ – периодичность проверок работоспособности объекта, проводимых с целью обнаружения отказа;

$t_{пр}$ - средняя продолжительность проверки работоспособности объекта;

$t_{вк}$ - средняя продолжительность восстановления работоспособности к-го объекта (к=1,2,...,n);

$t_{срк}$ – средняя наработка к-го объекта до отказа;

$\sigma_к^2$ – дисперсия наработки до отказа к-го элемента;

n – количество объектов (элементов), составляющих сложный объект;

$k_г$, $k_{0г}$ – коэффициенты готовности и оперативной готовности к-го объекта;

$t_{ик}$ – средняя продолжительность интервала времени от момента возникновения отказа к-го объекта до момента его проявления.

В качестве примеров рассмотрим четыре модели функционирования объектов при экспоненциальном и произвольном законах распределения случайных величин.

Модель 1. Объект функционирует в дежурном режиме в готовности к применению по назначению в течение времени τ. Сигнал на применение по назначению может быть подан в любой момент дежурства.

Отказ может наступить на любом этапе эксплуатации . Восстановление работоспособности осуществляется после наступления отказа. Профилактическое техническое обслуживание объекта не проводится.

В качестве показателей надежности в этом случае по формулам рассчитываются коэффициент оперативной готовности $К_{ог}$ и коэффициент готовности $К_г$ для стационарного режима функционирования объекта.

Коэффициент оперативной готовности. При экспоненциальном распределении наработки объекта до отказа

$$K_{ог} = \frac{t_{ср}}{t_{ср} + t_B} e^{-\frac{\tau}{t_{ср}}} \quad . \qquad (2.66)$$

При произвольном законе распределения наработки объекта до отказа

$$K_{ОГ} = \frac{t_{ср} - \int_0^{\tau} P(t)dt}{t_{ср} + t_B} \quad . \qquad (2.67)$$

Коэффициент готовности объекта. При произвольном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_Г = K_{ОГ}(\tau = 0) = \frac{t_{ср}}{t_{ср} + t_B} \quad . \qquad (2.68)$$

Для расчета показателей должны быть известны значения $t_{ср}$, σ, $t_{В}$, τ.

Пример. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) системы мониторинга НГК функционирует в дежурном режиме в готовности к работе по назначению. Продолжительность выполнения работы τ=150 ч. По статистическим данным найдены следующие значения:

- среднее время наработки до отказа ИВК, $t_{ср}$=2000 ч;
- среднее квадратическое отклонение времени наработки до отказа ИВК, σ_t=2000 ч;
- среднее время восстановления ИВК после отказа, $t_В$=30 ч.

Определить комплексные показатели надежности $К_{ог}$ и $К_г$.

Решение. 1. По формуле (2.66) находим

$К_{ог}$=2000*e $^{-150/2000}$/2000+30=0.914.

2. По формуле (2.68) находим

$К_г$=2000/2000+30=0.985.

Модель 2. Объект функционирует в дежурном режиме в готовности к применению по назначению в течение времени τ . По достижении определенной (запланированной) наработки $\boldsymbol{T}$ проводится регламентированное техническое обслуживание продолжительностью τ_0. Наработка $\boldsymbol{T}$ отсчитывается или от начала эксплуатации, или от окончания предыдущего технического обслуживания, или последнего восстановления. Отказ объекта может наступить на любом этапе эксплуатации, восстановление работоспособности объекта осуществляют сразу после наступления отказа.

В качестве комплексных показателей надежности в этом случае используются стационарные значения коэффициента оперативной готовности $К_{ог}$ и коэффициента технического использования $К_{ти}$.

Коэффициент оперативной готовности. При экспоненциальном распределении наработки до отказа объекта

$$K_{ОГ} = \frac{e^{-\frac{\tau}{t_{ср}}}(1-e^{-\frac{T}{t_{ср}}})}{(1-e^{-\frac{T}{t_{ср}}}) + \frac{t_0+t_B}{t_{ср}}e^{-\frac{T}{t_{ср}}} + \frac{t_B}{t_{ср}}} \quad . \qquad (2.69)$$

При произвольном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ОГ} = \frac{\int_0^T P(t+\tau)dt}{\int_0^T P(t)dt + (t_0 - t_B)P(t) + t_B} \quad . \qquad (2.70)$$

Коэффициент технического использования объекта. При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ти} = \frac{1-e^{-\frac{T}{t_{ср}}}}{(1-e^{-\frac{T}{t_{ср}}}) + \frac{t_0-t_B}{t_{ср}}e^{-\frac{T}{t_{ср}}} + \frac{t_B}{t_{ср}}} \quad . \qquad (2.71)$$

При произвольном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ти} = \frac{\int_0^T P(t)dt}{\int_0^T P(t)dt + (t_i - t_B)P(T) + t_B} \quad . \qquad (2.72)$$

Для расчета комплексных показателей надежности в условиях модели 2 необходимо знать: $t_{ср}$, σ, $t_В$, T, t_i , τ и закон распределения наработки.

Пример. Комплекс электроснабжения (КЭ) функционирует в дежурном режиме. Задача комплекса – обеспечение энергией спецоборудования в течение времени τ=70 ч.

Спецоборудование начинает выполнять задачу по сигналу, подаваемому в случайный момент времени.

После промежутка Т=1500 ч. работы КЭ подвергается техническому обслуживанию. Среднее время обслуживания t_0=40 ч. Подобное же обслуживание проводится и после восстановления КЭ после каждого отказа.

По статистическим данным известно , что среднее время наработки КЭ на отказ $t_{ср}$=2500 ч. , среднее квадратическое отклонение времени наработки на отказ КЭ σ=500 ч. , среднее время восстановления КЭ после отказа $t_В$=50 ч.

Среднее время обнаружения отказа после его возникновения $t_и$=10 ч.

Определить комплексные показатели надежности комплекса энергоснабжения $К_{ог}$ и $К_{ти}$ по формулам (2.71) и (2.72).

Модель 3. Объект функционирует в дежурном режиме в готовности к применению по назначению в течение времени τ . По достижении запланированной наработки Т проводят регламентированное техническое обслуживание объекта со средней его продолжительностью t_0 . Кроме этого, с периодичностью ТО-2 осуществляется проверка работоспособности объекта, средняя продолжительность проверки работоспособности $t_{пр}$. Отказ объекта может быть выявлен и устранен только при проверке работоспособности. Время между ТО обычно планируют кратным времени $\tau_{тр}$.

В качестве комплексных показателей используются стационарные значения коэффициента оперативной готовности и коэффициента технического использования объекта.

Коэффициент оперативной готовности. При экспоненциальном распределении наработки до отказа объекта

$$K_{ОГ} = \frac{t_{ср}(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}})e^{-\frac{\tau}{t_{ср}}}}{(t_0 - t_B)e^{-\frac{T}{t_{ср}}} + t_B + (T_{пр} + t_{пр})(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}})(1 - e^{-\frac{t}{t_{ср}}})^{-1}} \quad . \qquad (2.73)$$

При произвольном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ОГ} = \frac{\int_0^T P(t+\tau)dt}{(t_0 - t_B)P(t) + t_B + (T_{пр} + t_{пр})\sum_{k=0}^{d} P(kT_{пр})} \quad . \qquad (2.74)$$

<u>Коэффициент технического использования.</u> При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ТИ} = \frac{t_{ср}(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}})}{(t_0 - t_B)e^{-\frac{T}{t_{ср}}} + t_B + (T_{ТИ} + t_{пр})(1 - e^{-\frac{T}{t_{пр}}})(1 - e^{-\frac{T_{пр}}{t_{пр}}})^{-1}} \quad . \qquad (2.75)$$

При произвольном законе распределения наработки

$$K_{ТИ} = \frac{\int_0^T P(t)dt}{(t_0 - t_B)P(t) + t_B + (T_{пр} + t_{пр})\sum_{k=0}^{d} P(kT_{пр})} \quad . \qquad (2.76)$$

Для расчета комплексных показателей $К_{ог}$ и $К_{ти}$ в этом случае необходимы следующие исходные данные: $t_{ср}$, σ, $t_В$, t_0, T, $Т_{пр}$, $t_{пр}$, τ, закон распределения наработки до отказа объекта.

<u>Модель 4.</u> Объект функционирует в состоянии готовности к применению по назначению в течение времени τ. С периодичностью $Т_{пр}$ запланированы и проводятся проверки работоспособности объекта. Отказы обнаруживаются только в процессе проверки работоспособности и в процессе применения по назначению. При обнаружении отказа объект восстанавливается. При отсутствии отказа в процессе проверки работоспособности проводится регламентированное ТО со средним временем обслуживания t_0.

В качестве комплексных показателей используются стационарные значения коэффициента оперативной готовности и коэффициента технического использования объекта.

<u>Коэффициент оперативной готовности.</u> При экспоненциальном распределении наработки до отказа объекта

$$K_{ОГ} = \frac{t_{ср}\exp\left\{-\frac{\tau}{t_{ср}}\right\}(1-\exp\left\{-\frac{T_{пр}}{t_{ср}}\right\})}{T_{пр} + t_В + (t_0 - t_В)\exp\left\{-\frac{T_{пр}}{t_{ср}}\right\}} \quad . \tag{2.77}$$

При произвольном законе распределения наработки до отказа

$$K_{ОГ} = \frac{\int_0^{T_{пр}} P(t+\tau)dt}{T_{пр} + t_В + (t_0 - t_В)\exp\left\{-\frac{T_{пр}}{t_{ср}}\right\}} \quad . \tag{2.78}$$

Коэффициент технического использования. При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ти} = \frac{t_{ср}(1-e^{-\frac{T_{пр}}{t_{ср}}})}{T_{пр} + t_В + (t_0 - t_В)\exp\left\{-\frac{T_{пр}}{t_{ср}}\right\}} \quad . \tag{2.79}$$

При произвольном законе распределения наработки до отказа объекта

$$K_{ти} = \frac{\int_0^{T_{пр}} P(t)dt}{T_{пр} + t_В + (t_0 - t_В)P(T_{пр})} \quad . \tag{2.80}$$

Для расчета комплексных показателей $К_{ог}$ и $К_{ти}$ в этом случае необходимы следующие исходные данные: $t_{ср}$, σ , $t_В$, t_0 , $Т_{пр}$, τ, закон распределения наработки до отказа объекта.

Пример. Система обработки информации (СОИ) функционирует в режиме ожидания. Операция обработки начинается в случайный момент времени и продолжается τ=150 ч.

Проверки работоспособности проводятся с периодичностью $Т_{пр}$=1700 ч. Отказ выявляется при проверке работоспособности . При отказе системы восстанавливают её работоспособность, среднее время восстановления t_B=70 ч. Если при проверке выявилось отсутствие отказа, проводят техническое обслуживание в течение времени t_0=40 ч.

По данным статистики определены значения средней наработки СОИ до отказа $t_{ср}$=2000 ч. , среднего квадратического отклонения наработки СОИ до отказа σ=400 ч.

Определить комплексные показатели надежности системы обработки информации $К_{ог}$ и $К_{ти}$ по формулам (2.77) и (2.79).

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ

Моделирование на ЭВМ является мощным средством, широко применяемым при исследовании и анализе различных научных проблем. Оно дает возможность имитации особенностей функционирования ТУ в любых возможных условиях. При этом параметры изделия и окружающей среды можно варьировать для получения любой обстановки, в том числе и нереализуемой в натурных экспериментах. Для прогнозирования поведения ТУ можно экстраполировать результаты эксплутационных испытаний с помощью модели, построенной на ЭВМ. При этом данные, полученные при испытаниях, расширяются благодаря использованию статистического подхода.

Преимущества метода моделирования заключается в том, что применение ЭВМ сокращает продолжительность испытаний, модель является чрезвычайно гибким устройством, позволяющим воспроизводить любые как реальные, так и гипотетические ситуации, ибо на нее не распространяются никакие реальные ограничения. Кроме того, применение модели на этапах замысла и предварительного проектирования ТУ позволяет заранее определить успешность функционирования его, что исключает ненужные затраты трудовых и материальных ресурсов на построение нерациональных систем.

3.1. Прогнозирование отказов как средство повышения надежности ТУ

Под прогнозированием понимают экспериментальное или аналитическое предсказание моментов возникновения отказов техники. В зависимости от конкретных условий использования ТУ прогнозирование может проводиться с целью:

- определения интервала времени τ_n с момента измерения до первого отказа устройства;
- установления факта, что, начиная с момента измерения, в течение определенного наперед времени $\tau_з$ отказов не произойдет.

При практическом осуществлении прогнозирования необходимо путем соответствующих испытаний получить информацию о техническом состоянии объекта НГК,ППП обработать эту информацию с целью определения интервала τ_n или факт отсутствия отказов в интервале $\tau_з$.

По характеру исходных данных о законе изменения прогнозируемого параметра различают четыре метода прогнозирования: функциональный, скоростной, экстраполяционный и метод характерного признака. Дадим краткую характеристику каждого из методов.

Функциональный метод используется для прогнозирования в тех случаях, когда известен закон изменения прогнозируемого параметра П во времени:

$$П=П(t),$$

т.е. известна аналитическая запись этой функции и величины всех определяющих ее коэффициентов. В отдельных случаях эти коэффициенты могут быть случайными величинами. Тогда они должны быть заданы законами распределения.

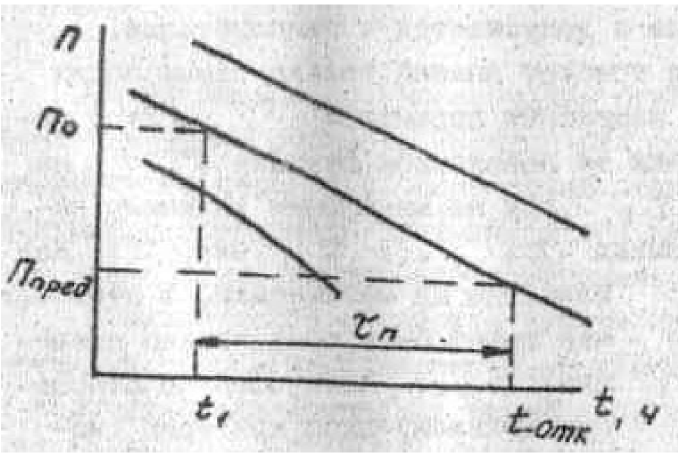

Рисунок 10

На рис.10 показано несколько реализаций функции изменения параметра П.

Измерение величины параметра П в момент t_1 позволяет выбрать реализацию, характеризующую данное конкретное устройство. После этого путем решения системы уравнений:

$$П(t_1)=П_0;$$

$$П(t_{отк})=П_{пред}.,$$

где $П_{пред}$ – предельный уровень отказа, может быть рассчитано время безотказной работы устройства τ_n.

Данный метод в практике эксплуатации вооружения применяется редко из-за отсутствия необходимых статистических данных и сложности построения функции П(t).

Скоростной метод требует меньшего объема знаний о законе изменения прогнозируемого параметра, чем функциональный. Для его осуществления необходимо только знание закона распределения скорости изменения параметра П вблизи предельного значения $П_{пред}$ (рис.11).

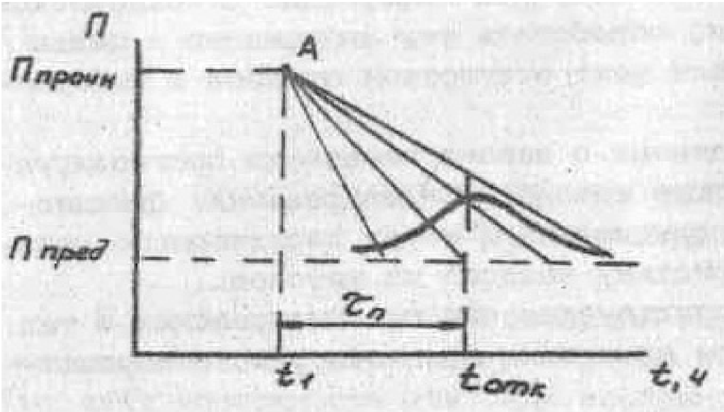

Рисунок 11

Изменение параметра П, начиная от (•) А начала прогнозирования t_1 происходит по одной из прямолинейных траекторий, задаваемых уравнением:

$$П(t)=П_{прчн} – a^*(t-t_1), \qquad (3.2)$$

где a* - случайная величина, численно равная скорости изменения параметра П в пределах $П_{пред} – П_{прочн}$.

Таким образом, сравнивая текущее значение выходного параметра П при нормальном или измененном режиме со специально установленным уровнем $П_{прочн}$, можно сделать вывод, что при $П>П_{прочн}$ система надежна и допускается к эксплуатации.

Экстраполяционный метод требует знаний только самых общих априорных сведений о законе изменения параметра П. Этот метод основывается на наблюдении за поведением функции П(t) на некотором интервале $t_i – t_1$ или на измерении величины параметра П в некоторых точках $t_1,...,t_i$ (рис.12).

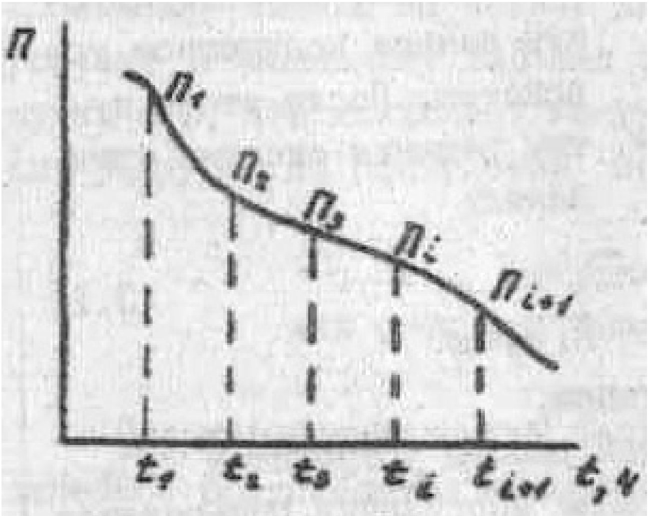

Рисунок 12

Как известно из математики, в этом случае может быть предсказано значение $П_{i+1}$, наилучшее по отношению к какому-либо критерию (например, минимальному значению среднеквадратичной ошибки).

Этот метод широко используется в автоматических системах контроля параметров, которые по результатам нескольких последовательных измерений позволяют рассчитать момент достижения параметром своего предельного состояния.

Метод характерного признака основывается на знании особенностей поведения функции П=П(t) в период времени, предшествующий наступлению отказа, Часто в эти моменты времени функция характеризуется значительно большей скоростью изменения, т.е. большим значением производной $\frac{dП}{dt}$, что может быть положено в основу прогнозирования отказа. Так, резкое изменение величины сопротивления резистора типа ОМЛТ, наблюдаемое при изменении условий его охлаждения, может предсказать перегорание резистора, которое наступит через несколько минут (рис.13)

Очевидно, данный метод может быть использован для прогнозирования внезапных отказов, хотя малый интервал τ_n составляет существенное затруднение в реализации метода.

3.2. Аналитические способы обработки данных при экстраполяционном методе прогнозирования отказов.

Общая задача прогнозирования отказов может быть сформулирована следующим образом. Имеется ряд результатов измерений прогнозируемого параметра. Необходимо подобрать аппроксимирующую функцию и определить величину этого параметра через определенное время после последнего измерения.

Аналитическая обработка данных производится главным образом методами теории приближенных функций. Задача обработки сводится к получению аналитических выражений, удобных для прямой и обратной экстраполяций. Выбор конкретного метода обработки определяется характером сведений о прогнозируемом параметре, а также временем, которое может быть затрачено на производство необходимых вычислений.

Под характером сведений о прогнозируемом параметре понимают сведения о законе изменения прогнозируемого параметра во времени, о количестве измерений этого параметра, об их точности, а также о распределении результатов этих измерений во времени. Обычно при прогнозировании располагают следующими сведениями:

- аналитической записью закона изменения прогнозируемого параметра во времени;
- характером закона изменения прогнозируемого параметра во времени.

Кроме того, как правило, имеются данные результатов измерения прогнозируемого параметра в определенные моменты времени.

Поскольку обработка данных невозможна без сведений хотя бы о характере закона изменения прогнозируемого параметра, то в случае, когда закон не известен, предварительно по результатам измерений необходимо подобрать эмпирическую формулу.

Эмпирическую формулу подбирают, руководствуясь опытом и принципами аналитической геометрии или методом сличения. Для подбора методом сличения по экспериментальным данным строят график, который затем сличается с образцами известных кривых. Построение графика обычно не вызывает особых трудностей, так как характер монотонно убывающей функции справедлив для подавляющего большинства прогнозируемых процессов. Аналитически монотонно убывающие функции наиболее просто представляются с помощью полиномов. Подбирая эмпирическую формулу, следует стремиться, чтобы она достаточно точно представляла экспериментальные данные и содержала возможно меньшее число произвольных постоянных.

После того как характер уравнения для представления опытных данных установлен $П=\varphi(t,a_0,a_1,...,a_n)$, задача сводится к определению коэффициентов выбранного аналитического выражения $a_0,a_1,...,a_n$. Эти коэффициенты чаще всего определяются, исходя из условия совпадения экспериментальных точек с функцией, выражающей закон изменения прогнозируемого параметра во времени, или в соответствии с критерием метода наименьших квадратов, согласно которому наилучшими коэффициентами $a_0,a_1,...,a_n$ аналитического выражения $\varphi(t, a_i)$ считаются те, для которых сумма квадратов укклонений

$$\sum_{i=1}^{n}\left[\varphi(t_i, a_0, \ldots, a_n) - y_1\right]^2 \qquad (3.3)$$

будет минимальной. В этом выражении y_1 – найденные экспериментальные значения прогнозируемого параметра в моменты времени t_1.

Вычисление неизвестных коэффициентов возможно на основании любого из названных условий. Однако результаты, получаемые в этих случаях, как правило, отличаются. Дело в том, что условие совпадения аналитического выражения с экспериментальными точками не всегда оправдано, так как результаты измерений искажаются погрешностями. С этой точки зрения критерий метода наименьших квадратов более предпочтителен, поскольку он позволяет построить функцию, отражающую общий ход данной зависимости без копирования местных уклонений.

Следует отметить, что вычисление коэффициентов аналитического выражения методом наименьших квадратов требует больших затрат труда и времени, чем вычисление коэффициентов при условии совпадения экспериментальных точек с функцией, выражающей закон изменения прогнозируемого параметра. Поэтому при аналитической обработке данных надо принимать во внимание погрешности измерения прогнозируемого параметра с тем, чтобы грамотно выбрать путь для определения коэффициентов полинома a_0, a_1, ... , a_n.

Сказанное ранее справедливо и тогда, когда закон изменения прогнозируемого параметра известен. В этом случае приближенная зависимость находится с целью упрощения сложного аналитического выражения, что облегчает вычисления и сокращает затраты времени на необходимые расчеты.

Рассмотрим наиболее употребительные приемы аналитической обработки данных.

В соответствии с условием совпадения экспериментальных точек с выбранным полиномом (полиномом, представляющим закон изменения прогнозируемого параметра во времени) аналитическая зависимость прогнозируемого параметра во времени может быть получена с помощью интерполяционных формул Ньютона и Лагранжа.

Интерполяционная формула Ньютона

$$П(t_n + St_n) = y_n + S\Delta y_{n-1} + \frac{S(S+1)}{2!}\Delta y_{n-2}^2 + ... + \frac{S(s+1)...(S+n-1)}{n!}\Delta y_0^n$$

$$S = \frac{t-t_n}{t_k} \qquad (3.4)$$

где $\Delta y_0 = y_1 - y_0$; $\Delta y_0^{2} = \Delta y_1 - \Delta y_0$; $\Delta y_0^{k} = \Delta y_1^{k} - \Delta y_0^{k-1}$;

$\Delta y_1 = y_2 - y_1$; $\Delta y_1^{2} = \Delta y_2 - \Delta y_1$; $\Delta y_1^{k} = \Delta y_2^{k-1} - \Delta y_1^{k-1}$;

. . . .

$\Delta y_{n-1} = y_n - y_{n-1}$; $\Delta y_{n-1}^{2} = \Delta y_n - \Delta y_{n-1}$; $\Delta y_{n-1}^{k} = \Delta y_n^{k-1} - \Delta y_{n-1}^{k-1}$;

может быть успешно использована для получения аналитического выражения и экстраполяции в том случае, когда измерения прогнозируемого параметра производились через равные промежутки времени $t_к$.

Пример. Определить зависимость прогнозируемого параметра от времени, а также вычислить его значение при t=6 по следующим данным $t_0=0$; $t_1=1$; $t_2=3$; $t_3=4$; $y_0=60$; $y_1=54.5$; $y_2=52.0$; $y_3=49.5$, если известно, что изменение параметра описывается полиномом 3-й степени.

Решение. Для расчета по формуле Ньютона составим таблицу разностей

t_i	y_i	Δy	Δy^2	Δy^3
0	60			
1	54.5	-5.5	+3	
2	52.0	-2.5	0	-3 -3
3	49.5	-2.5	-3	
4	44.0	-5.5		

Подставляя найденные значения в формулу, получим :

$$П = 44 + (t-4)(-5.5) + \frac{(t-4)(t-3)}{2}(-3) + \frac{(t-4)(t-3)(t-2)}{2 \cdot 3}(-3) = 60 - 8t + 3t^2 - 0.5t^3$$

Предполагаемое значение параметра в момент времени t=6 можно рассчитать по найденному аналитическому выражению или вычислить по формуле.

На практике не всегда удается, да и в ряде случаев нецелесообразно, производить измерения через равные промежутки времени. При наличии таких данных формула Ньютона и не применима и следует пользоваться выражением Лагранжа для интерполяционного полинома:

$$П(t)=\sum_{i=0}^{n} y_i \frac{\prod_{s=0}^{n}(t-t_s)}{\prod_{\substack{s=0\\ s\neq i}}^{n}(t_i-t_3)}, \qquad (3.5)$$

где y_i – измеренные значения параметра в моменты времени t_i.

Формула Лагранжа, так же как и формула Ньютона, может быть непосредственно использована для экстраполяции, а также для определения коэффициентов аналитического выражения предполагаемой зависимости, если она имеет вид полинома. Следует, однако. Отметить, что при определении указанных коэффициентов выкладки довольно громоздки и сложность их возрастает с увеличением степени полинома. Всилу этих обстоятельств формула Лагранжа малопригодна для быстрого вычисления коэффициентов и гораздо удобнее для экстраполяции.

Как уже отмечалось ранее, формулы Лагранжа и Ньютона применяются в тех случаях, когда точность приносится в дань относительной простоте вычислений или когда заведомо известно, что погрешности измерений невелики. В противном случае используется метод наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов позволяет найти наилучшие уравнения для представления опытных данных, искаженных погрешностями. Особенность этого метода состоит еще и в том, что он дает возможность использовать m экспериментальных точек для определения коэффициентов полинома n-й степени, когда m>(n+1). Если известно, что закон изменения прогнозируемого параметра описывается полиномом n-й степени

$a_0t^n + a_1t^{n-1} + a_2t^{n-2} + ...+ a_n$,

и что в результате измерений в моменты времени t_i найдено m значений прогнозируемого параметра, причем m>(n+1) , то определить коэффициент полинома n+1 из системы m уравнений нельзя, так как такая система несовместна. Это в свою очередь означает, что через m точек нельзя провести кривую, описываемую полиномом n-й степени. Критерий метода наименьших квадратов позволяет так определить коэффициенты полинома n-й степени, чтобы сумма квадратов уклонений экспериментальных точек от кривой была наименьшей.

Сумма квадратов уклонений равна:

$$E = \sum_{i=1}^{n} [\varphi(t_i, a_0, a_1, ..., a_n) - y_1]^2 .$$

Условия минимума этой суммы определяются уравнениями:

$$\frac{dE}{da_0} = 0; \quad \frac{dE}{da_1} = 0; \; ... ; \; \frac{dE}{da_n} = 0.$$

Отсюда получается система уравнений для определения коэффициентов полинома:

$$\begin{aligned}
&a_0 \sum_{i=0}^{m} t_i^{2n} + a_1 \sum_{i=0}^{m} t_i^{2n-1} + ... + a_n \sum_{i=0}^{m} t_i^{n} = \sum_{i=0}^{m} y_i t_i^{n};\\
&a_0 \sum_{i=0}^{m} t_i^{2n-1} + a_1 \sum_{i=0}^{m} t_i^{2n-2} + ... + a_n \sum_{i=0}^{m} t_i^{n-1} = \sum_{i=0}^{m} y_i t_i^{n-1};\\
&...\\
&a_0 \sum_{i=0}^{m} t_i^{n} + a_1 \sum_{i=0}^{m} t_i^{n-1} + ... + a_n \sum_{i=0}^{m} 1 = \sum_{i=0}^{m} y_i.
\end{aligned} \qquad (3.6)$$

<u>Пример.</u> Найти по методу наименьших квадратов аналитическое выражение зависимости прогнозируемого параметра, представленного следующими экспериментальными данными: t_0=18; t_1=19; t_2=20; t_3=21; y_0= 70; y_1=66; y_2=61; y_3=56, если характер зависимости представляется полиномом 2-й степени.

Решение. Для определения коэффициентов a_0, a_1, a_2 составим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
&a_0 \sum_{i=0}^{4} t_i^{4} + a_1 \sum_{i=0}^{4} t_i^{3} + a_2 \sum_{i=0}^{4} t_i^{2} = \sum_{i=0}^{4} y_i t_i^{2};\\
&a_0 \sum_{i=0}^{4} t_i^{3} + a_1 \sum_{i=0}^{4} t_i^{2} + a_2 \sum_{i=0}^{4} t_i^{1} = \sum_{i=0}^{4} y_i t_i^{1};\\
&a_0 \sum_{i=0}^{4} t_i^{2} + a_1 \sum_{i=0}^{4} t_i^{1} + 4a_2 = \sum_{i=0}^{4} y_i.
\end{aligned}$$

Подставляя численные значения получим:

$570778a_0+29942a_1+1526a_2=95602;$

$29942a_0+1526a_1+78a_2=4910;$

$1562a_0+78a_1+48a_2=253.$

Эту систему линейных уравнений можно решить с помощью определителей. После вычислений находим:

a_0=-0.25 ; a_1=5.05 ; a_2=60.15 .

Таким образом, аналитическое выражение зависимости прогнозируемого параметра, определенное на основе экспериментальных данных, имеет вид

П=-0.25t^2+5/05t+60.15.

Перечисленные методы не исчерпывают всех возможных приемов аналитической обработки данных, а относятся лишь к наиболее распространенным способам, используемым при прогнозировании постепенных отказов.

3.3 Моделирование надежности технических устройств методом статистических испытаний.

Для исследования надежности ТУ с помощью ЭВМ применяется вероятностное (имитационное) моделирование, при котором моделирующий алгоритм воспроизводит, имитирует реальные и случайные явления, являющиеся характерными чертами процесса появления отказов и восстановлений исследуемого объекта.

Моделирующий алгоритм строится по математической модели системы с учетом характеристик ЭВМ. Математическая модель составляется по описанию моделируемой системы. Описание включает подробные сведения, характеризующие структуру системы, условия, продолжительность работы и особенности эксплуатации ее элементов, законы распределения наработки до отказа и времени восстановления отказавших элементов и т.п. При составлении математической модели обычно упрощают описание, стремясь добиться минимума вычислительных затрат (минимального объема и времени вычислений) при заданной точности моделирования.

Моделирующий алгоритм указывает логическую последовательность действий при воспроизведении математической модели системы на ЭВМ. Алгоритм удобно представлять в виде блок-схемы операторов, каждый из которых изображает достаточно крупную группу элементарных арифметических и логических операций.

Операторы блок-схемы моделирующего алгоритма изображается геометрическими фигурами, связанными стрелками, которые показывают последовательность операций при решении задачи. Обычно в виде прямоугольников изображаются операторы, выполняющие формирование случайных величин и функций, неслучайных величин и функций, арифметические операции и другие вычислительные действия. Операторы, которые включают логические операции проверки выполнения условий и выбора направления решения задачи, в зависимости от выполнения(признак 1) или невыполнения (признак 0) заданного условия принято изображать в виде ромба.

Необходимое количество испытаний N для обеспечения заданной точности вычисления показателей надежности определяется на основе закона больших чисел и центральной предельной теоремы теории вероятностей.

Так как полученная в результате вероятностного моделирования оценка $\bar{a}$ некоторого параметра a является случайной величиной, о равенстве $a \approx \bar{a}$ принято говорить, что оно имеет точность ε с достоверностью α, если вероятность неравенства $|a - \bar{a}| < \varepsilon$ равна α, т.е.

$$P\{|a - \bar{a}| < \varepsilon\} = \alpha.$$

Необходимое количество испытаний для получения оценки Р вероятности наступления некоторого события с требуемой точностью ε и достоверностью α определяется по формуле:

$$N = Za^2 \frac{P(1-P)}{\varepsilon^2} \quad , \qquad (3.7)$$

где Za – квантиль нормального распределения для достоверности α.

Так как оцениваемая вероятность Р неизвестна, можно воспользоваться для определения N следующими двумя способами:

1. Назначают количество испытаний N^*=50÷100 и оценивают значение $P^*=m/N^*$, которое подставляют в формулу (3.7) для определения N.
2. В формулу (3.7) подставляют значение оценки P^*, полученное другим , менее точным способом.

Необходимое количество испытаний для получения оценки $\bar{a}$ математического ожидания случайной величины а с требуемой точностью ε и достоверностью α определяется по формуле

$$N = \frac{{Z_a}^2 {\sigma_a}^2}{\varepsilon^2}, \qquad (3.8)$$

где σ_a – среднее квадратическое отклонение величины а.

Необходимо отметить следующие основные особенности применения вероятностного моделирования для решения задач исследования надежности.

1. Благодаря легкости повторения реализаций случайного процесса смены состояний системы можно получать большие выборки для оценки показателей надежности с высокой точностью. Чтобы при этом не хранить результаты моделирования, используют рекуррентные алгоритмы, вычисляя оценки показателей надежности по ходу моделирования. При этом большом объеме выборки имеется возможность использования простых асимптотических формул.

Чтобы при вычислении оценок моментов к-го порядка распределения наработки до отказа, вычисляют суммы $\sum_{j=1}^{N} (\tau_j - m_t)^K$ с помощью рекуррентной формулы

$$\sum_{j=1}^{N} (\tau_j - m_t^*)^k = S_{k,N} + KN^{-1} S_{k-1,N} S_{1,N} + C_k^2 N^{-2} S_{k-2,N} S_{1,N}^2 + N^{-k} S_{1,N}^k \quad , \qquad (3.9)$$

где $S_{Z,N} = \sum_{j=1}^{N} \tau_j^2$; r=1,2, . . . ,k ;

$C_k^i = \frac{k(k-1)...(k-l+1)}{l!}$.

Таким образом, по мере получения значений τ_j в результате вероятностного моделирования вычисляют и запоминают сумму $\sum_{j=1}^{N} \tau_j$ при оценке m_t^* - средней наработки до отказа (или между отказами), а , при оценке D_t^* - дисперсии наработки до отказа – сумму $\sum_{j=1}^{N} \tau_j^2$.

Вычисление оценок производится, когда выполняется условие j=N.

2. Часто приходится моделировать систему (устройство) по частям (подсистемам, блокам и т. д.). При этом результаты моделирования одного объекта часто являются исходным данными для моделирования более крупной системы. В этом случае при выборе показателей надежности и их оценки необходимо учитывать удобство построения моделирующего алгоритма для более крупной схемы.

3. Для достижения заданной точности вычисления оценок показателей надежности при вероятностном моделировании высоконадежных систем с большим количеством элементов требуются значительные затраты машинного времени из-за необходимости получения большого количества реализаций N, из которых существенная часть оказывается неинформативной вследствие отсутствия отказов высоконадежных элементов в течение заданной наработки $(0,\tau_j)$

Чтобы избежать при этом больших затрат машинного времени, используют специальные приемы. Одним из таких приемов является объединение элементов с приблизительно одинаковой интенсивностью отказов λ_i . Затем вычисляют вероятности P_i того, что отказавший элемент принадлежит l-й группе:

$$P_i = \frac{m_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i \lambda_i} ,$$

где m_i – количество элементов i-го типа; n – количество групп.

Учитывая, что $\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$, используют вероятность P_i как “вес”

Для определения группы, в которую входит отказавший элемент. С этой целью проводится проверка по единичному жребию. Последовательно сравниваются $l_k = \sum_{i=1}^{k} P_i$ с равномерно распределенным на интервале (0,1) случайным числом ξ .Выбирается к-я группа, для которой $l_{k-1}<\xi<l_k$. Номер

отказавшего элемента, для которого формируется значение случайной наработки до отказа, определяется как целое значение числа $k\xi_1 m_1+1$.

Таким образом, удается не проводить последовательную проверку работоспособности каждого элемента, а рассматривать в первую очередь элементы с низкой надежностью.

3.4 Типовые алгоритмы решения задач надежности

3.4.1. Общая схема алгоритма вероятностного моделирования в задачах надежности.

Алгоритмы вероятностного моделирования при решении задач исследования надежности имеют однородную структуру, которую можно представить в виде общей блок-схемы (рис.14), состоящей из трех типовых операторов.

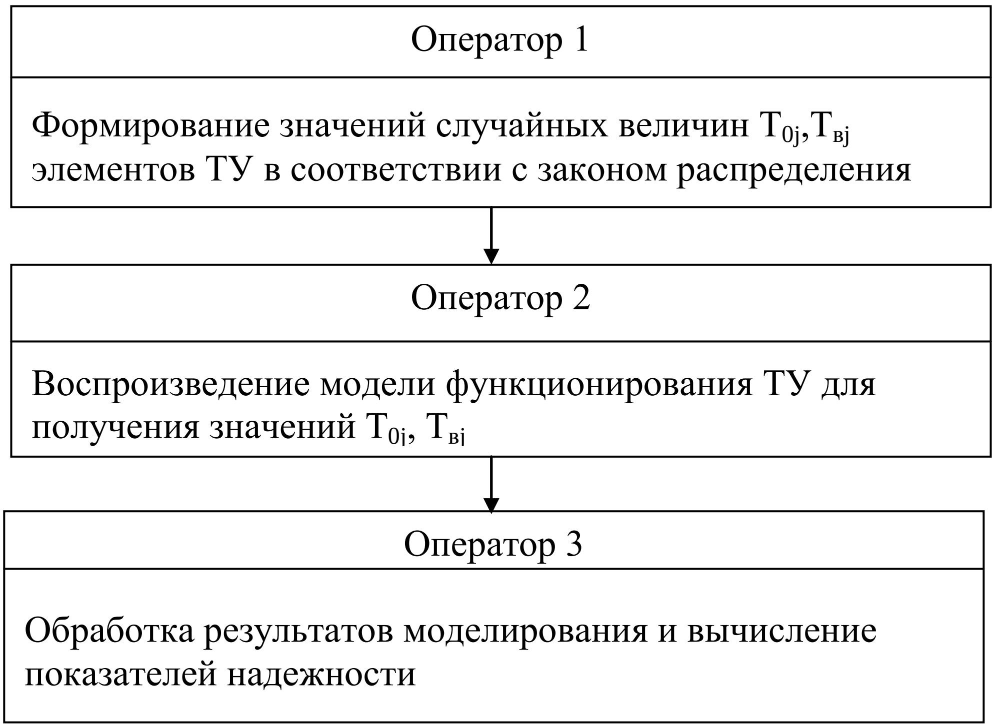

Рисунок 14

Оператор 1 является типовым для случаев, когда выделены работоспособное и неисправное состояния каждого элемента. Предназначен для формирования возможных значений случайных величин: наработки до отказа (времени безотказной работы) $\tau_{j\eta}$ и времени восстановления $\tau_{bj\eta}$ элементов при $j=1,2,...,N$; $\eta=1,2,...,m$, где N – количество испытаний (воспроизведение модели системы на ЭВМ); m – количество элементов в системе.

Оператор II предназначен для воспроизведения модели системы. Выходной информацией оператора является совокупность N значений наработки до отказа T_{0j} и времени восстановления T_{bj} для системы в целом.

В случае использования логической модели построение алгоритма работы оператора определяется видом переменного в системе резервирования.

Оператор III предназначен для обработки результатов вероятностного моделирования надежности. При этом используются формулы, приведенные в гл. 2.

Ниже рассмотрены алгоритмы вычисления показателей надежности неремонтируемых и ремонтируемых систем, каждый из которых является типовым вариантом оператора 3.

3.4.2. Типовой алгоритм вычисления показателей надежности невосстанавливаемых ТУ. Для неремонтируемых систем по результатам вероятностного моделирования вычисляются оценки показателей надежности $P^*(t)$, $Q^*(t)$,$f^*(t)$,$\lambda^*(t)$,m_t^*,σ_t^*, формулы вычисления которых по экспериментальным данным о наработке до отказа приведены в гл. 2. Временная эпюра, поясняющая процесс моделирования значений наработки до отказа неремонтируемой нерезервированной системы, изображена на рис.15. Блок-схема алгоритма вычисления показателей надежности невосстанавливаемой системы представлена на рис.16.

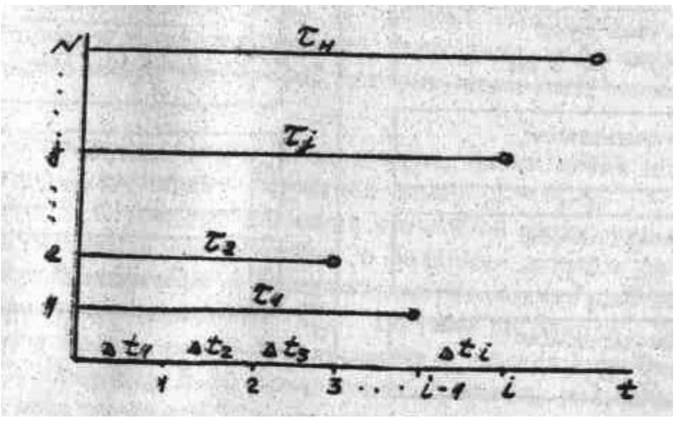

Рисунок15

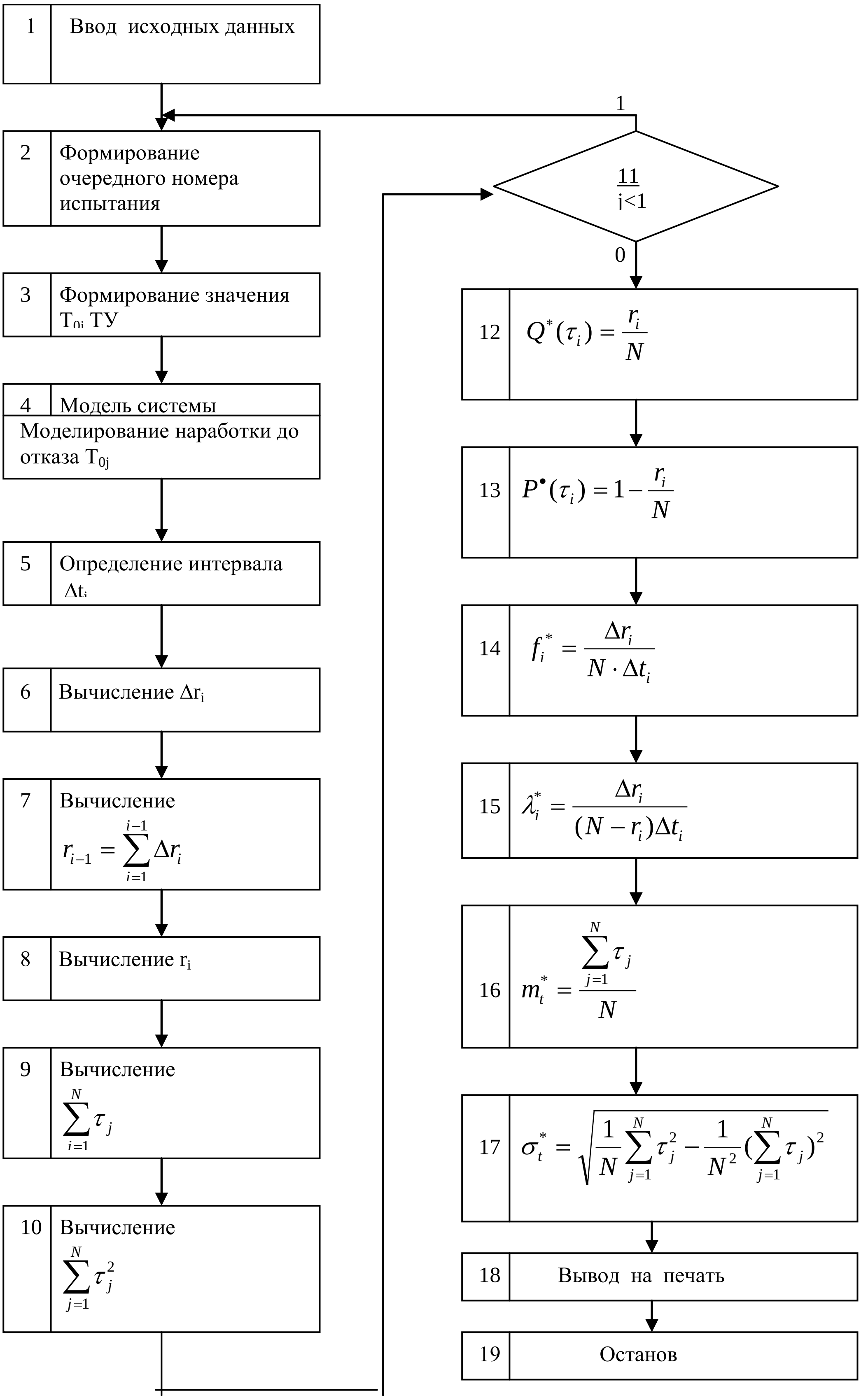
1 Ввод исходных данных
2 Формирование очередного номера испытания
3 Формирование значения T_{0i} ТУ
4 Модель системы
Моделирование наработки до отказа T_{0j}
5 Определение интервала Δt_i
6 Вычисление Δr_i
7 Вычисление $r_{i-1} = \sum_{i=1}^{i-1} \Delta r_i$
8 Вычисление r_i
9 Вычисление $\sum_{i=1}^{N} \tau_j$
10 Вычисление $\sum_{j=1}^{N} \tau_j^2$
11 i<1
1
0
12 $Q^*(\tau_i) = \frac{r_i}{N}$
13 $P^{\bullet}(\tau_i) = 1 - \frac{r_i}{N}$
14 $f_i^* = \frac{\Delta r_i}{N \cdot \Delta t_i}$
15 $\lambda_i^* = \frac{\Delta r_i}{(N - r_i)\Delta t_i}$
16 $m_t^* = \frac{\sum_{j=1}^{N} \tau_j}{N}$
17 $\sigma_t^* = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\tau_j^2 - \frac{1}{N^2}(\sum_{j=1}^{N}\tau_j)^2}$
18 Вывод на печать
19 Останов

Рисунок 16

Входной информацией для алгоритма вычисления перечисленных выше оценок является совокупность значений случайной наработки τ_j до отказа, полученных в результате заданного числа испытаний.

Весь диапазон возможных значений наработки до отказа системы делится на n интервалов $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, где i=1,2, . . . ,n . Выделяется оператор для подсчета количества Δr_i отказов системы, приходящихся на i –й интервал наработки. В результате после N испытаний каждому интервалу будут соответствовать определенные числа Δr_1, Δr_2, . . . ,Δr_n. Выделяется также оператор для подсчета накопленного количества отказов системы $r_i = \sum_{i=1}^{r-1} \Delta r_i$ к началу рассматриваемого i – го интервала наработки.

Для вычисления оценки $P^*(t_i)$ вероятности безотказной работы (или вероятности отказа) удобно выделить оператор, который строит ряд чисел:

$r_1 = \Delta r_1;$

$r_2 = \Delta r_1 + \Delta r_2;$

. . . .

$r_n = \Delta r_1 + \Delta r_2 + \ldots + \Delta r_n.$

Каждое из этих чисел представляет собой количество отказов системы, приходящееся соответственно на интервалы наработки $(0,t_i)$, в течение которого вычисляется вероятность безотказной работы.

Для вычисления оценок m_t^* - средней наработки до отказа и σ_t^* - среднего квадратического отклонения наработки до отказа необходимо иметь операторы, которые вычисляют суммы $\sum_{j=1}^{N} t_j$ и $\sum_{j=1}^{N} t_j^2$.

Работа алгоритма состоит в следующем. После ввода исходных данных оператор 2 формирует очередной номер j=1,2 ..., N испытаний. Оператор 3 формирует значения случайной наработки до отказа элементов системы в соответствии с заданным законом распределения. С помощью оператора 4 воспроизводится модель системы, и формируется значение наработки τ_j системы до отказа. Далее работает группа операторов 5-19, входящих в состав обобщенного оператора 3. Операторы 5-10 производят обработку результатов вероятностного моделирования и подготавливают исходные данные для вычисления показателей надежности. Оператор 2 проверяет выполнение условия $j<N$. Если это условие выполняется, формируется признак I и управление вновь передается оператору 2 для формирования номера следующего j+1 испытания системы. Когда проверяемое условие $j<N$ не выполняется, значит, воспроизведено заданное число N испытаний системы. Управление по признаку 0 передается операторам 12-17, которые производят вычисление оценок показателей надежности невосстанавливаемых устройств.

Типовой алгоритм вычисления показателей надежности восстанавливаемых ТУ. Для ремонтируемых систем по результатам вероятностного моделирования по формулам, приведенным в гл. 2, вычисляются оценки показателей надежности $\omega^*(t)$, m_t^*, $k_г^*(t)$, $P^*(t)$. Временная эпюра случайной ситуации, сложившейся в j-м испытании при конечном случайном времени восстановления, изображена на рис. 17. Входной информацией для алгоритма вычисления статистических оценок показателей надежности восстанавливаемого устройства является совокупность N значений случайной наработки до отказа τ_j и случайного времени окончания восстановления τ_{bj}.

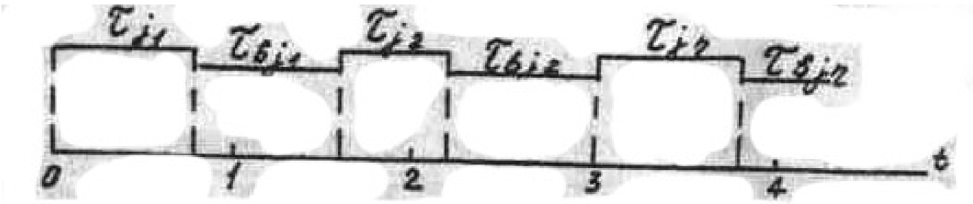

Рисунок 17

Из временной эпюры случайной ситуации видно, что значение наработки до возникновения отказов в каждом испытании могут быть вычислены по формуле

$$T_{0j\eta} = \sum_{\eta}(\tau_{j\eta} + \tau_{bj\eta-1}).$$

Значения времени окончания восстановления соответственно равны:

$$T_{bj\eta} = \sum_{\eta}(\tau_{j\eta} + \tau_{bj\eta}).$$

В формулах вычисления $T_{0j\eta}$ и $T_{bj\eta}$ индекс η=1,2,...,n означает номер отказа в j-м испытании.

Для вычисления статистических оценок показателей надежности весь диапазон возможных значений случайных величин $T_{0j1},...,T_{0j\eta}$ и $T_{bj1},...,T_{bj\eta}$ делится на n равных интервалов Δt.

Выделяются операторы, определяющие номера интервалов $\alpha_i = \frac{T_{0j\eta}}{\Delta t} + 1$, в которые попадают значения наработки до отказа $T_{0j\eta}$, и номера интервалов $\beta_i = \frac{T_{Bj\eta}}{\Delta t} + 1$, в которые попадают значения времени окончания восстановления $T_{bj\eta}$.Необходимо заметить, что $\frac{T_{0j\eta}}{\Delta t}$ и $\frac{T_{bj\eta}}{\Delta t}$ являются целыми числами.

Определение значений $T_{0j\eta}$ и $T_{bj\eta}$ производится в j-м испытании до тех пор, пока не выполняются условия α_i>n и β_i>n. В результате проведения N испытаний в каждом из интервалов Δt_i накапливается некоторое количество Δr_i отказов, которое используется для вычисления оценок параметра потока отказов ω_i^* и функции готовности $K_г^*(t_i)$.

Для вычисления статистической оценки $\tilde{m}_t^*$ - средней наработки на отказ необходимо иметь значения общего числа отказов в N испытаниях $-\sum_{i}^{N} r_j$, где r_j – количество пар случайных чисел $\tau_{j\eta}$ и $\tau_{bj\eta}$ или , иначе, количество отказов (восстановлений), получаемых в каждом отдельном j-м испытании, а также суммарной наработки $\sum_{j}^{N}\sum_{\eta}^{r_j}\tau_{j\eta}$.

При вычислении статистической оценки вероятности безотказной работы $D^*(t_i, t_i+\Delta t)$ восстанавливаемого ТУ в течении наработки $(t_i, t_i+\Delta t)$ обычно принимают допущение о стационарности параметра потока отказов ω_t^* определяют вероятность безотказной работы $P^*(t_i)=\exp[-\omega_t^* t_i]$ в течении наработки $(0, t_i)$.

Работа алгоритма (рис. 18) заключается в следующем. После формирования оператором 3 случайных значений наработки до отказа $\tau_{0j\eta}$ и времени восстановления $\tau_{bj\eta}$ элементов $j=1,2,...,N$; $\eta=1..m$ управление передается оператору 4, который воспроизводит модель системы. Выходной информацией оператора являются значения наработки до отказа $T_{0j\eta}$ и времени окончания восстановления $T_{bj\eta}$ системы. Операторы 5 и 6 определяют номера интервалов α_i и β_i. Логический оператор 7 и оператор 8 обеспечивают присвоение α таких значений, которые не превышают выбранного количества интервалов n. Операторы 9, 10, 11 вычисляют соответственно Δr_i, $\sum_{j=1}^{N} r_j$ и $\sum_{j=1}^{N}\sum_{\eta=1}^{r_j}\tau_{j\eta}$, подготавливая вычисления показателей надежности. Оператор 12 проверяет условие окончания j-го испытания. Суммирование $T_{0j\eta}$ и $T_{bj\eta}$ будет идти до тех пор, пока не выполнится условие $\alpha>n$, $\beta>=n$ окончания моделирования. При $j>N$ управление передается операторам 14-17, которые вычисляют показатели надежности восстанавливаемых ТУ.

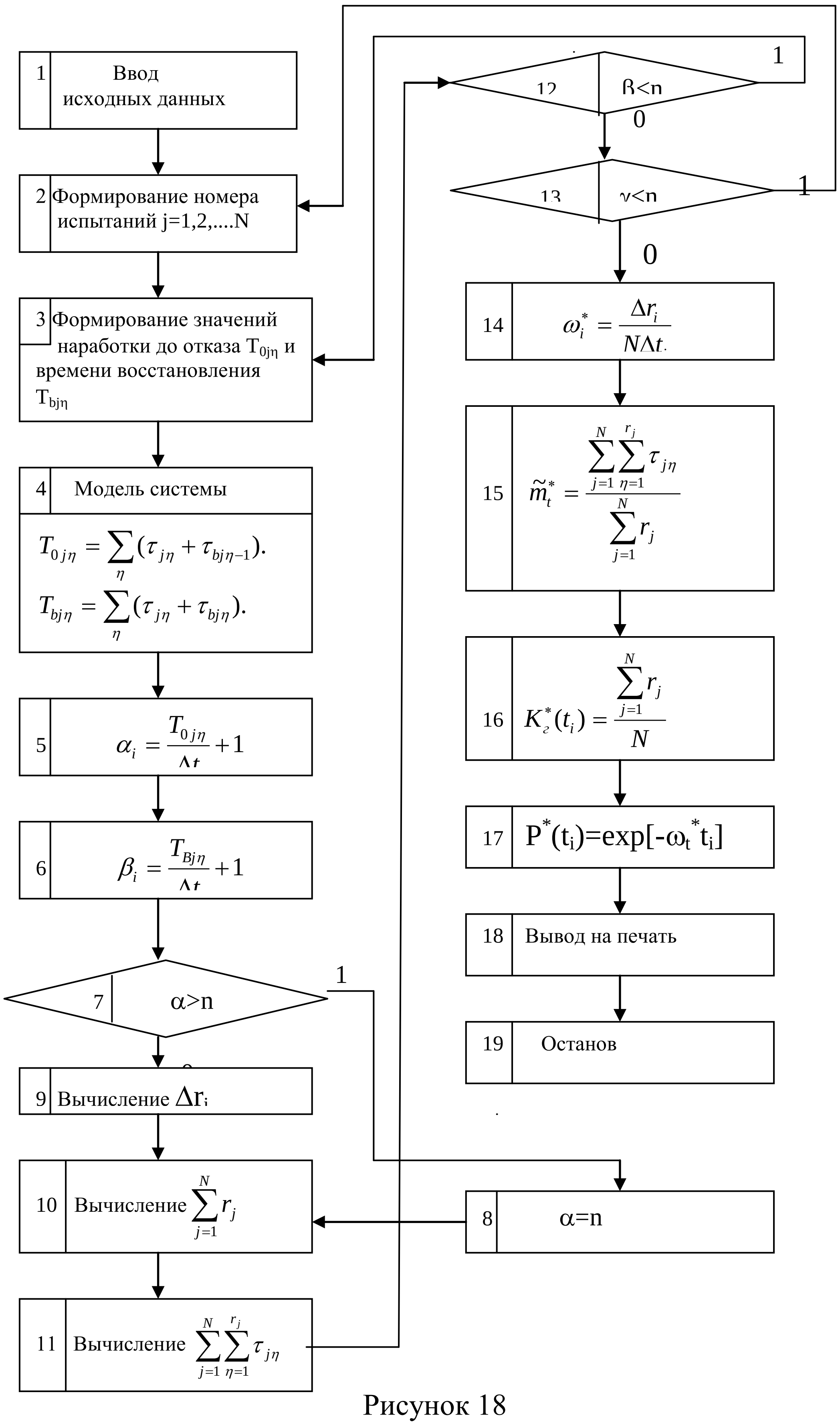
1 Ввод исходных данных
2 Формирование номера испытаний j=1,2,....N
3 Формирование значений наработки до отказа $T_{0j\eta}$ и времени восстановления $T_{bj\eta}$
4 Модель системы
$T_{0j\eta} = \sum_{\eta}(\tau_{j\eta} + \tau_{bj\eta-1})$.
$T_{bj\eta} = \sum_{\eta}(\tau_{j\eta} + \tau_{bj\eta})$.
5 $\alpha_i = \frac{T_{0j\eta}}{\Delta t} + 1$
6 $\beta_i = \frac{T_{Bj\eta}}{\Delta t} + 1$
7 α>n
1
9 Вычисление Δr_i
10 Вычисление $\sum_{j=1}^{N} r_j$
11 Вычисление $\sum_{j=1}^{N}\sum_{\eta=1}^{r_j}\tau_{j\eta}$
8 α=n
12 β<n
1
0
13 γ<n
1
0
14 $\omega_i^* = \frac{\Delta r_i}{N\Delta t}$
15 $\tilde{m}_t^* = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{\eta=1}^{r_j}\tau_{j\eta}}{\sum_{j=1}^{N} r_j}$
16 $K_г^*(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N} r_j}{N}$
17 $P^*(t_i)=\exp[-\omega_t^* t_i]$
18 Вывод на печать
19 Останов

Рисунок 18

4. ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТУ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Задача по поддержанию надежности ТУ в процессе эксплуатации имеет свои особенности, главные из которых состоят в следующем:

1)при условии соблюдения всех предписанных правил эксплуатации отказы ТУ все-таки имеют место. Их наличие обуславливается в основном заложенными свойствами при проектировании и производстве. Означает ли это, что в процессе эксплуатации нельзя повысить надежность? Нет, не означает. Специалисты службы главного инженера могут оказывать существенное влияние на повышение надежности ТУ (и даже могут превзойти ее промышленный уровень);

2)надежностью, достигнутой при разработке и производстве ТУ, а также в процессе эксплуатации, определяются требуемая экологичность, безопасность и эффективность применения ТУ. Поэтому задачу по поддержанию высокого уровня надежности при эксплуатации, являющуюся важнейшей задачей, необходимо рассматривать в двух аспектах:

- соблюдая все правила эксплуатации, необходимо поддерживать потенциально возможный уровень надежности, заложенный в ТУ при его проектировании и производстве;
- применяя новые, прогрессивные методы и средства эксплуатации, разрабатывая различные эксплуатационные мероприятия, необходимо повышать уровень надежности.

Одной из главных задач специалистов НГК является поддержание на определенном уровне надежности техники в процессе ее эксплуатации.

Основными путями поддержания надежности являются:

1. Доработки ТУ по бюллетеням – промышленный метод повышения надежности, разработка которого основана на предложениях инженерно-технического состава предприятия.

В процессе эксплуатации ТУ инженер анализирует причины отказов и разрабатывает предложения по их предупреждению (изменение принципиальных схем и конструкций, замена отдельных ненадежных элементов, изменение режимов и т. д.).

Эти предложения направляются на предприятия промышленности, которые и разрабатывают бюллетени по доработкам ТУ.

Таким образом, бюллетени по доработкам являются звеном обратной связи между службой и промышленностью.

2. Анализ технического состояния ТУ в целях проведения профилактических мероприятий. Техническая диагностика.

3. Прогнозирование отказов.

4. Выполнение всех плановых профилактических работ на основе научно обоснованных методов определения их объема и периодичности.

5. Инструментальная проверка и тренировка всех элементов и узлов, устанавливаемых в ТУ взамен вышедших из строя.

6. Повышение квалификации специалистов и внедрение НОТ в организацию эксплуатации техники.

Ниже рассматриваются главные пути поддержания надежности.

4.1. Обоснование периодичности технического обслуживания ТУ.

Принцип определения периодичности и объема профилактических работ. Для поддержания надежности ТУ предусматривается профилактическое обслуживание. При выполнении профилактических мероприятий обычно назначаются сроки, время их проведения и объем.

Профилактические мероприятия, на выполнение которых установлены определенная периодичность и время их проведения, называют техническим обслуживанием (ТО).

Объем профилактических работ удобно оценивать затратами времени на их выполнение. Средние затраты времени на выполнение ТО в течении какого-то календарного времени t могут быть определены по формуле

$$T_{cp}(t) = N_{mo}(t)\sum_{i=1}^{n_0}\tau_{moi} ,$$

где N_{mo}=t/$t_0 \approx$ 1,2,...,n – количество видов ТО за время t (округленное до целого числа);

T_{mo} – периодичность выполнения ТО;

τ_{moi} – среднее время выполнения i-й операции ТО (например, при замере параметра или чистке коллектора электрической машины);

n_{0n} – число операций при выполнении одного вида ТО.

Из формулы следует, что объем ТО зависит от количества операций n_{0n} , записанных в инструкцию по ТО, времени выполнения каждой операции τ_{mo} и периодичности выполнения ТО T_{mo}.

Определим периодичность выполнения ТО при следующих допущениях и ограничениях:

1) образцы являются восстанавливаемыми объектами. Схема работы объекта за время t представляет собой чередование трех возможных состояний: отдыха (хранения), работы по подготовке ТУ к применению, т.е. ТО и, наконец, использование по назначению (рис.19) . Причем ТУ находится во включенном состоянии только часть (незначительную часть) времени, остальное время находится в обеспеченном состоянии (в режиме хранения);

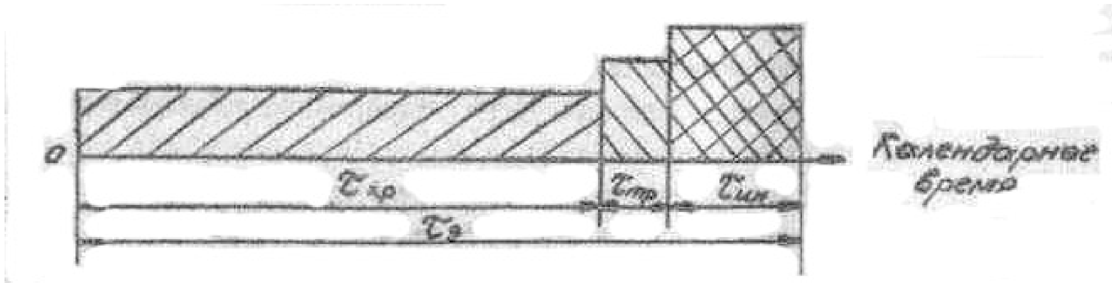

Рисунок 19

2) потоки отказов ТУ в режиме хранения и при работе являются простейшими. Это означает, что отказы ТУ будут независимыми;

3) все отказы, обнаруженные в ТУ во время выполнения ТО, устраняются;

4) часть отказов (преимущественно постепенных, обусловленных в основном выходом параметров за поле допуска) в межрегламентный период не устраняется, так как по этим параметрам отсутствует инструментальный контроль.

С учетом этих условий при выборе периодичности выполнения регламентных работ для поддержания надежности ТУ на уровне не ниже $P_{доп}$ будем исходить из соотношения

$$P(t) >= P_{доп}\ , \qquad (4.1)$$

где $P_{доп}$ – минимальное допустимое значение вероятности безотказной работы к моменту окончания использования ТУ по назначению, т.е. после истечения трех последовательных состояний (см. рис. 19).

С другой стороны, согласно предполагаемой схеме использования ТУ имеем:

$$P(t) = P_{хр}(t_{хр})P_{то}(t_{то})P_{ин}(t_{ин})\ , \qquad (4.2)$$

где $P_{хр}(t_{хр}) = e^{-\lambda_{хр}t_{хр}}$ -вероятность безотказного хранения ТУ за время $t_{хр}$;

$P_{то}(t_{то}) = e^{-\lambda_{то}t_{то}}$ - вероятность безотказной работы ТУ при подготовке его к использованию по назначению за время $t_{то}$;

$P_{ин}(t_{ин}) = e^{-\lambda_{ин}t_{ин}}$ - вероятность безотказной работы ТУ при использовании по назначению за время $t_{ин}$.

Для оценки сохраняемости удобно использовать коэффициент пересчета параметра потока отказов в виде отношения интенсивности отказа ТУ хранения к периоду ТО

$$K_{хр} = \frac{\lambda_{хр}}{\lambda_{то}} = \frac{T_{о3}}{T_{0хр}}\ , \qquad (4.3)$$

где $\lambda_{то}$- значение параметра потока отказов ТУ при ТО.

По аналогии коэффициент использования ТУ по назначению можно рассчитать по формуле

$$K_{ин} = \frac{\lambda_{ин}}{\lambda_{mo}} = \frac{T_{o3}}{T_{0B}} \quad . \qquad (4.4)$$

Сравнивая соотношения (4.1) и (4.2) , можно записать

$$P_{хр}(t_{хр})P_{mo}(t_{mo})P_{ин}(t_{ин})>=P_{доп} \; . \qquad (4.5)$$

Из физических соображений ясно, что при уменьшении периодичности $P_{доп}$ выполнения ТО минимальный уровень надежности будет повышаться (так как часть отказов за счет, например, разрегулировок будет предупреждаться), но вместе с этим будет повышаться и объем ТО, что для нас невыгодно. Поэтому целесообразно брать максимально возможное значение периода ТО, который соответствует равенству в выражении (4.5). Тогда формула (4.5) примет следующий вид :

$$e^{-\lambda_{xp}t_{xp}} \; e^{-\lambda_{mo}t_{mo}} \; e^{-\lambda_{ин}t_{ин}} >= P_{доп} \; . \qquad (4.6)$$

С учетом выражений (4.3) и (4.4) левую часть формулы можно упростить:

$$e^{-\lambda_{xp}t_{xp}} \; e^{-\lambda_{mo}t_{mo}} \; e^{-\lambda_{ин}t_{ин}} = \; e^{-\lambda_{vmo}(K_{xp}t_{xp}+t_{mo}+K_{ин}t_{ин})} = e^{-\lambda_{mo}Tmo\max}, \qquad (4.7)$$

где $T_{mo\,max}$ – максимальный эквивалентный период выполнения ТО.

Тогда формулу (4.6) с учетом выражения (4.7) можно записать

$$e^{-\lambda_{mo}Tmo\max} = P_{доп} \quad . \qquad (4.8)$$

Если прологарифмировать уравнение (4.8), то выражение $T_{mo\,max}$ (с учетом введенных обозначений) можно записать в следующем виде:

$$T_{T0MAX} = K_{XP}t_{XP} + t_{m0} + K_{ИН}t_{ИН} = -\frac{\ln P_{доп}}{\lambda_{m0}} = T_{03}\ln P_{доп} = T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| \qquad (4.9)$$

Из формулы (4.9) следует, что в основу назначения периодичности Т0 для ТУ необходимо положить смешанный принцип:

- в зависимости от времени хранения $t_{хр}$;
- в зависимости от наработки $t_{ин}$ и t_{m0} .

Поэтому при эксплуатации ТУ надо строго учитывать время его работы.

Зная величины t_{m0} и $t_{хр}$, из формулы (4.9) легко найти допустимое максимальное время хранения, удовлетворяющее равенствам (4.6) – (4.9),

$$t^0_{XP} = \frac{T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| - t_{m0} - K_{ИН}t_{ИН}}{K_{XP}} \quad . \qquad (4.10)$$

С другой стороны, максимально возможный период между Т0 можно получить, как сумму времен трех состояний

$$T_{T0MAX} = t_{m0} + t_{ИН} + t_{XP} \quad , \qquad (4.11)$$

где $t_{хр}$ – допустимое максимальное время хранения, определяемое по формуле (4.10).

Тогда выражение (4.11) с учетом формулы (4.10) принимает вид:

$$T_{m0MAX} = t_{m0} + t_{ИН} + \frac{T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| - t_{m0} - K_{ИН}t_{ИН}}{K_{ХР}} \quad , \qquad (4.12)$$

Приведя формулу (4.12) к общему знаменателю, имеем

$$T_{m0MAX} = \frac{T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| + t_{m0}(K_{ХР} - 1) + (K_{ХР} - K_{ИН})t_{ИН}}{K_{ХР}} \quad , \qquad (4.13)$$

После нахождения подобных членов получим

$$T_{m0MAX} = \frac{T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| + t_{m0}(K_{ХР} - 1) + (K_{ХР} - K_{ИН})t_{ИН}}{K_{ХР}} \quad , \qquad (4.14)$$

Формула (4.14) является окончательной и весьма точной. Однако для качественного анализа ее упростим.

На практике для современных ТУ величины коэффициентов пересчета могут быть приближенно оценены следующими значениями:

$$\begin{aligned} K_{ХР} &\approx (1-10)10^{-3} \\ K_{ИН} &\approx 10^{-1} \end{aligned} \quad . \qquad (4.15)$$

Заметим, что $K_{хр} << K_{ин}$.

С учетом коэффициентов (4.15) формулу (4.14) можно записать в следующем виде:

$$T_{m0MAX} \approx \frac{T_{03}\left|\ln P_{доп}\right| - t_{m0} - K_{ИН}t_{ИН}}{K_{ХР}} \quad . \qquad (4.16)$$

Формула (4.16) является приближенной, по ней в количественном отношении может быть произведена лишь грубая оценка T_{m0max}, так как нам не известны точные значения $K_{хр}$,$K_{ин}$ и трудно задать нужное $P_{доп}$. Однако она хороша для чисто качественного анализа зависимости T_{m0max}. Поэтому и сделаем из нее необходимые выводы:

1. Чем больше T_{03}, т.е. чем потенциально более надежное ТУ при работе, тем больше T_{m0max}, т.е. реже нужно проводить ТО.
2. Чем больше заданный уровень надежности ТУ к концу периода его использования по назначению $P_{доп}$ (тем меньше абсолютное значение $\ln P_{доп}$), тем меньше T_{m0max}, т.е. тем чаще необходимо выполнять ТО.
3. Чем больше $t_{ин}$, тем меньше T_{m0max} (тем чаще необходимо проводить ТО, так как при использовании ТУ по назначению на него воздействуют все многообразие факторов, снижающих надежность).

4. Чем меньше $K_{ин}=T_{03}/T_{0В}$ (при фиксированном значении T_{03} меньшее значение $K_{ин}$ возможно только при большей величине $T_{0В}$, т.е. при более высоконадежной работе ТУ), тем больше T_{m0max}, т.е. тем реже можно проводить ТО.
5. Чем меньше $K_{хр}=T_{03}/T_{0хр}$ (а это возможно для данного ТУ с его T_{03} только при большем значении показателя безотказности в период хранения), тем больше T_{m0max}.

4.2. Расчет комплектов запасных частей, инструмента и принадлежностей

При рассмотрении задач надежности были получены некоторые исходные предпосылки, которые могут быть использованы для решения ряда других эксплуатационных задач.

Рассмотрим некоторые из них.

4.2.1. Расчет количества запасных невосстанавливаемых элементов. Для обеспечения возможности быстрого восстановления ТУ путем замены комплектующих элементов необходимо иметь запасные элементы в количестве R, не меньшем, чем ожидаемое количество отказов $n_{от}$ за определенное время t. Математическим языком это выражается так: $R \geq n_{от}$ за время t .

За расчетное время t принимается обычно календарный год или другое время, в течение которого не предполагается пополнение запаса.

Точное значение $n_{от}$ нам неизвестно. Поэтому мы можем довольствоваться только простейшим случаем, когда

$$R \geq n_{от} \geq n_{ср} \quad , \tag{4.17}$$

где $n_{ср}$ - среднее количество ожидаемых отказов какого-то элемента за указанное время t.

Найдем $n_{ср}$ при следующих допущениях: поток отказов является простейшим, число элементов данного типа в системе равно N, элементы за период t находятся в рабочем режиме времени $t_р$ и имеют при этом интенсивность отказов $\lambda_р$, остальное время $t\text{-}t_р$, простаивают, т.е. находятся в режиме простоя времени $t_{пр}$ и имеют при этом интенсивность отказов $\lambda_{пр}$.

Тогда среднее число отказов

$$n_{ср} \approx N(\lambda_р t_р+\lambda_{пр} t_{пр}). \tag{4.18}$$

Неравенство (4.17) с учетом выражения (4.18) принимает вид:

$$R \geq N(\lambda_р t_р+\lambda_{пр} t_{пр})=n_{ср} \ . \tag{4.19}$$

В реальных случаях число отказов $n_{от}$ может быть больше или меньше среднего значения $n_{ср}$, поэтому необходимо знать, какова вероятность того, что число отказов $n_{ср}$ не превысит числа запасных элементов, т.е.

$$\gamma = P\{n_{ср}<=R\}. \qquad (4.20)$$

Если бы нам потребовалось найти вероятность того, что произойдет ровно К отказов, то для простейшего потока отказов она определилась бы по формуле Пуассона

$$P_K = \frac{n_{CP}^K}{K!} e^{-n_{ПР}}, \qquad (4.21)$$

Но мы не знаем, сколько будет отказов за время t, поэтому должны перебрать все вероятности от К=0 до К=R. Тогда вероятность того, что среднее число отказов $n_{ср}$ не превысит числа запасных элементов R (т.е. доверительную вероятность), можно записать в виде суммы вероятностей $P_к$

$$\gamma = \sum_{k=0}^{R} P_K = \sum_{k=0}^{R} \frac{n_{CP}^k}{K!} e^{-n_{CP}} . \qquad (4.22)$$

Теперь из выражения (4.22) видна зависимость (функция)

$$R = \varphi(\gamma, n_{ср}). \qquad (4.23)$$

Эта функция затабулирована, и ее значения приводятся в таблицах справочников (приложение табл.2). Вычислив $n_{ср}$ и задаваясь γ, по табл.2 находят R.

Следует отметить, что на практике произведение $\lambda_{пр}t_{пр}$ обычно бывает неизвестным из-за того, что все отказы, возникшие при простое, появляются только во время включенного состояния аппаратуры, поэтому их относят, как правило, к отказам за счет работы аппаратуры.

Поэтому среднее число отказов на практике подсчитывается по формуле

$$n_{ср} \approx N\lambda_p t_p . \qquad (4.24)$$

При расчетах следует иметь в виду также, что запасные элементы R, хранящиеся на складах, тоже могут отказывать, поэтому в рассчитанное количество запасных элементов необходимо внести поправку r, которая подсчитывается:

$$r \approx R\lambda_{хр}t_{хр} \ , \qquad (4.25)$$

где $\lambda_{хр}$ – интенсивность отказов при хранении (на складах);

$t_{хр}$ – время хранения.

Таким образом, общее количество запасных элементов

$$R_0 = R + r \ . \qquad (4.26)$$

В заключение отметим, что вопросам расчета ЗИП невосстанавливаемых элементов в настоящее время уделяется достаточно большое внимание. Некоторые авторы довели свои исследования до инженерных методик (14). Накоплен большой статистический материал, который может быть использован при реализации разработанных методик. Однако, рассмотренная выше методика, не претендуя на математическую строгость, может быть рекомендована пока что как прикидочная, упрощенная.

4.2.2. Оценка потребного количества запасных ремонтируемых ТУ. На первый взгляд задача по определению количества запасных блоков кажется аналогичной предыдущей. Следует, казалось бы, только условиться, что под элементом мы будем понимать блок, узел т.п. Но это не так просто. В предыдущей задаче мы имели дело с невосстанавливаемыми элементами типа ЭВП, ППП, конденсаторов, резисторов и др., а здесь – с ремонтируемыми объектами: блоками, узлами и даже целыми системами, которые при нормальной организации технической эксплуатации обязательно надо иметь в качестве запасных. Очевидно, что количество запасных блоков, узлов должно быть меньше ожидаемого количества их отказов за данный промежуток времени. Так как каждый запасной объект нужен для подмены рабочего только на время ремонта последнего. А по условию ординарности простейшего потока невозможно, чтобы отказали одновременно все блоки, узлы или станции.

Задача формируется так. Требуется определить количество запасных блоков R, необходимых для функционирования системы, состоящей из N блоков (это могут быть, например, стойки, пульты, установленные на однотипных агрегатах) с вероятностью P(R) того, что система будет обеспечена запасными блоками, т.е. с доверительной вероятностью. Эта задача является трудной, поэтому мы ее лишь сформулируем, укажем план решения и затем приведем окончательный результат. Такая задача обычно решается при следующих ограничениях:

1) распределение времени до отказа блока подчиняется экспоненциальному закону при интенсивности отказов, равной λ;
2) время на замену неисправного блока начинается сразу же после замены, а интенсивность восстановления равна $\mu = 1/T_В$;
3) все случайные величины времени безотказной работы и времени восстановления взаимонезависимы, но выполняется условие

$$N\lambda/\mu = a < 1, \qquad (4.27)$$

где $N\lambda$ - интенсивность отказов системы из N блоков;

μ - интенсивность восстановления только одного блока.

Накладывая условие (4.27), мы хотим, чтобы первая интенсивность была меньше второй. Это необходимо для того, чтобы не было простоев ТУ из-за отсутствия уже отремонтированных блоков;

4) отказ системы блоков происходит только тогда, когда в момент отказа нет ни одного запасного блока, т.е. в самой худшей из возможных практических ситуаций;
5) все блоки поддаются ремонту.

При этих ограничениях вероятность P(R) того, что рассматриваемая система будет обеспечена запасными блоками, может быть найдена. На практике для приближенного расчета R интересуются вероятностью противоположного события, т.е. вероятностью Q(R) необеспечения системы запасными блоками

$$Q(R)=1-P(R)\ . \qquad (4.28)$$

Доказано, что минимально необходимое число запасных блоков (узлов) R должно быть таким, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$Q(R)\rangle\frac{\alpha^{R+1}}{(R+1)!}e^{-\alpha}\ . \qquad (4.29)$$

Значение R, удовлетворяющие неравенству (4.29), находятся (путем подбора) следующим образом.

По заданному значению P(R) с помощью выражения (4.28) находят Q(R). Затем, назначая R целыми числами, т.е. 1,2,3 и т.д., подсчитывают правую часть неравенства (4.29). Минимальное значение R , при котором неравенство (4.29) выполняется, принимается как результат оценки потребного количества запасных блоков ил узлов ТУ.

Рассмотренная методика оценки R не претендует на полноту и соблюдение всех математических строгостей, однако она вполне удовлетворяет интересам инженерной практики.

5. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ ТУ

Без учета экономических факторов (затраты, получаемый экономический эффект) нельзя с достаточной убедительностью обосновать мероприятия по повышению надежности. Рассмотрим некоторые вопросы, непосредственно связанные с мероприятиями по обеспечению надежности.

Экономические вопросы имеют весьма большое значение и при решении задач создания ТУ, и при выборе средств обеспечения их надежности.

Увеличение долговечности изделий равносильно вводу в строй новых комплексов, а увеличение времени безотказной работы снижает потери от их простоя, увеличивает боеготовность военной техники. Чем более ответственные функции выполняет изделие, тем большее значение приобретает его надежность, так как в ряде случаев потеря работоспособности может привести к катастрофическим последствиям, и при этом не экономические затраты, а именно катастрофические последствия являются определяющими.

5.1 . Количественная оценка влияния надежности ТУ на его экономические показатели

Для количественной оценки влияния надежности на экономические показатели изделий должны использоваться общепринятые показатели экономической эффективности технических средств:

- коэффициент экономической эффективности капитальных вложений;
- срок окупаемости капитальных вложений;
- стоимость ущерба от техногенного риска с учетом надежности;
- годовая прибыль с учетом надежности объекта.

Методика их определения изложена в литературе и директивных документах.

Рассмотрим задачи, непосредственно связанные с влиянием надежности на экономические показатели.

Определение экономии, полученной от повышения безотказности изделий. Экономия средств, получаемая при использовании более надежного изделия за время t , определяется по формуле

$$Э=(n_1 З_{1\ обсл}+C_{1n}) – (n_2 З_{2\ обсл}+C_{2n}) , \qquad (5.1)$$

где n_1 и n_2 – число отказов менее надежного и более надежного изделий за время t (n_i=[1-P(t)]N) , здесь

P(t) – вероятность отсутствия отказов за время t;

N – число изделий, находящихся в эксплуатации;
$З_{1\ обсл}$, $З_{2\ обсл}$ – затраты на обслуживание менее надежного и более надежного изделия;
$С_{1п}$, $С_{2п}$ – потери, вызванные отказами менее надежного и более надежного изделий.

В формуле (5.1) не учитывается снижение экономии, вызванное уменьшением экономического эффекта (экономия и затраты присходят в разное время) , а также то, что с ростом t за пределы цикла эксплуатации, имеет место увеличение амортизационных отчислений (это приводит к повышению экономического эффекта). Поэтому (5.1) – приближенная формула расчета. Затраты на обслуживание $З_{1\ обсл}$ и $З_{2\ обсл}$ складываются из затрат на технические осмотры, обслуживание, профилактику, устранение неисправностей и ремонты. Размер затрат определяется по нормативным документам после того, как составлен график обслуживания и определено ожидаемое число отказов.

Потери $С_{1п}$ и $С_{2п}$ вызванные отказами , определяются стоимостью простоя изделия. Нахождение количественного значения этих потерь может потребовать анализа влияния простоя данного изделия на потери в смежных областях. Например, простой ЭВМ может привести не только к тому, что машина проработает меньше часов, но также и к тому, что произойдет срыв заданий, зависящих от ее работы.

Для ориентированных расчетов экономического эффекта значение потерь, вызванных отказами, определяется с ориентацией на средние типовые ситуации применения изучаемого объекта.

Часто требуется определить экономию средств при использованииболее надежного изделия не в абсолютном выражении, как это было сделано выше, а в относительном, например относительно стоимости эталонного изделия $Ц_1$, т.е. изделия, надежность которого используется для сравнения.

Итак, пусть стоимость эталонного изделия равна $Ц_1$. При отказе изделия оно заменяется на другое работоспособное. Обозначим затраты на замену эталонного изделия $З_1$, потери вызванные отказом эталонного изделия $П_1$, среднее количество отказов за время эксплуатации – n. Тогда затраты за время эксплуатации таких эталонных изделий будут

$$Ц_1(n+1)+(З_1+П_1)n\ . \qquad (5.2)$$

Если вместо эталонного используется изделие, обладающее такими же характеристиками, но повышенной надежности, то затраты на его эксплуатацию

$$Ц_2(к+1)+(З_2+П_2)к\ , \qquad (5.3)$$

где $Ц_2$, к, $З_2$, $П_2$ – стоимость, число отказов, затраты на замену и потери, вызванные отказами, для изделия с повышенной надежностью.

Уравнивая расходы на эксплуатацию для эталонного изделия и изделия с повышенной надежностью, можно определить стоимость последнего, которая, естественно должна быть выше стоимости эталонного:

$$Ц_1(n+1)+(З_1+П_1)n= Ц_2(к+1)+(З_2+П_2)к .$$

Разность $Ц_2$-$Ц_1$=ΔЦ может служить мерой экономии, полученной в результате повышения безотказности:

$$\Delta Ц = \frac{[Ц_1(n-k)-(З_1+П_1)n-(З_2+П_2)k]}{k+1} . \qquad (5.4)$$

Если $(З_1+П_1)= (З_2+П_2)=(З+П)$,

то $$\Delta Ц = \frac{[(n-k)(З+П-Ц_1)]}{k+1} . \qquad (5.5)$$

Определение экономии от повышения долговечности изделий

Экономичность изделия, зависящая от увеличения его долговечности, оценивается годовыми амортизационными отчислениями, т. е. затратами на приобретение изделия, отнесенными к продолжительности его использования. Чем меньше амортизационные отчисления, тем больше экономии получает потребитель.

Введем следующие обозначения: $Ц_0$ – базисная стоимость, т. е. первоначальная стоимость изделия, ΔЦ – надбавка к стоимости изделия, которая может быть сделана в результате повышения долговечности; $Т_с$ и $Т_1$ – соответственно предельные сроки службы базисного изделия и изделия повышенной долговечности.

Амортизационные расходы при эксплуатации базисного изделия и изделия с повышенной долговечностью

$$А_0=Ц_0/Т_0 \ ; \ \ А_1=(Ц_0-ΔЦ_0)/Т_1 \ . \qquad (5.6)$$

Для получения потребителем экономии от использования более долговечного изделия необходимо, чтобы амортизационные расходы $А_1$ были несколько ниже амортизационных расходов $А_0$. Обозначим это снижение к$ΔЦ_0$. Тогда при $А_0=А_1+ кΔЦ_0$ надбавка к стоимости изделия, определяющая экономию от повышения его долговечности,

$$ΔЦ_0=Ц_0(Т_1-Т_0)/[Т_0(1+кТ_1)]. \qquad (5.7)$$

Расчет по формуле (5.7) приближенный. Он не учитывает такие факторы, как продолжительность цикла, эксплуатация, ликвидационная стоимость изделий, снятых с эксплуатации после срока службы, и др. Однако он позволяет получить ориентировочное представление об экономии от увеличения долговечности изделия. Увеличение долговечности изделий эквивалентно увеличению их выпуска. Однако на этом основании нельзя делать вывод о том, что оптимальная долговечность – это долговечность максимально возможная. С ростом долговечности растет экономия, но увеличиваются и затраты на техническое обслуживание. Оптимальная долговечность определяется суммарным экономическим эффектом, зависящим от состояния экономии и затрат. Моральный износ также вызывается тем, что в результате научно-технического прогресса появляются новые объекты, выполняющие аналогичные функции, но обладающие более совершенными характеристиками. Это приводит к тому, что эксплуатация старого объекта становится нецелесообразной (она морально устаревает), хотя физическое старение его еще и не наступило.

Определение затрат на повышение надежности объекта путем их резервирования и использования более надежных элементов. Существует много разнообразных способов повышения безотказности объекта. Среди них наиболее распространены резервирование и применение комплектующих элементов повышенной надежности. Затраты на резервирование и на применение более надежных элементов определяются обычными приемами нахождения себестоимости промышленных объектов (сначала для исходного уровня надежности, а затем для повышенного уровня надежности).

Основные затраты:

- основные материалы;
- изделия, полуфабрикаты собственного производства;
- основная зарплата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления на социальное страхование;
- амортизационные отчисления;
- цеховые расходы;
- общезаводские расходы;
- внепроизводственные расходы.

Изучение затрат на изготовление объекта позволяет обнаружить, что отношение ψ на комплектующие элементы к общим затратам сохраняет постоянство для каждого из типов производственного процесса. Для производства с преобладанием простых сборочных операций ψ=0.65. Для производства с преобладанием сложных ручных операций (прошивка матриц, навивка обмоток на ферритовые кольца и др.) ψ=0.25. Это обстоятельство дает возможность осуществлять приближенные расчеты себестоимости, для чего необходимо по характеру производства выбрать значение коэффициента ψ, затем определить затраты на комплектующие элементы и разделить их на значение коэффициента ψ.

Такой расчет себестоимости может быть рекомендован для приближенного определения возрастания или убывания себестоимости объекта при изменении либо его структуры, либо комплектующих элементов. Характер производства при этом остается неизменным, следовательно, ошибка выбора значения ψ не имеет существенного значения.

5.2 Методика определения затрат на повышение надежности

Цель расчета: определить дополнительные затраты, вызванные повышением аппаратурной надежности изделия.

В исходных данных указывается:

- структурный состав начального варианта изделия и стоимость элементов структуры;
- числовое значение коэффициента ψ - отношение стоимости комплектующих элементов к стоимости изделия;
- структурный состав изделия с повышенной надежностью и стоимость элементов структуры.

Последовательность решения поставленной задачи:

1. Суммированием стоимости комплектующих элементов определяют суммарные затраты $З_0$ на комплектующие элементы начального варианта изделия.

2. Делением $З_0$ на коэффициент ψ определяется стоимость изделия, изготовленного по начальному варианту, т.е. $С_0=З_0/\psi$.

3. Суммированием стоимости комплектующих элементов изделия повышенной надежности определяются суммарные затраты $З_1$ на элементы, входящие в состав изделия повышенной надежности (табл. 12 приложения).

4. Делением $З_1$ на ψ определяется стоимость изделия повышенной надежности, т.е. $С_1=З_1/\psi$.

5. Разность $С_1$-$С_0$=$\Delta С_0$ – затраты, связанные с повышением надежности.

6. Показатели аппаратурной надежности изделий, изготовленных по начальному и улучшенному варианту, определяются по формулам расчета, изложенным в гл.2.

7. Стоимость комплектующих элементов задается либо на основании действующих прейскурантов, либо на основании информации об аналогичных изделиях.

8. Числовое значение коэффициента ψ задается на основании следующих соображений.

Изучением статистических данных установлено, что коэффициент ψ может принимать значение в пределах от 0.25 до 0.75. Чем больше сложность сборочных операций, тем меньше ψ, т.е. доля стоимости элементов в общей стоимости изделия становится меньше.

При задании требований на расчет учитывается степень сложности изделия и задается значение ψ в пределах от 0.25 до 0.75. Ошибка в определении этого значения не скажется существенно на определении относительных затрат на повышении надежности, так как она будет одинаково влиять на надежность начального варианта и на надежность конечного варианта.

Пример. Определить затраты на изготовление усилителя мощности повышенной надежности, так как коэффициент готовности исходного варианта усилителя оказался недостаточным $К_г$=0.9.

Предполагается повысить надежность путем резервирования. Первый вариант резервирования требует дополнительно резервный усилитель и переключающее устройство. Второй вариант резервирования требует дополнительно два резервных усилителя и переключающее устройство. Стоимость усилителя – 2 у.е. Стоимость переключающего устройства – 3 у.е.

Коэффициент готовности переключающего устройства $К_г$=0.99.

Коэффициент ψ=0.5.

1. Стоимость изделия по начальному варианту

$С_0=З_0/\psi=2.50/0.50=5$ у.е.

2. Коэффициент готовности изделия по начальному варианту

$К_г=0.9$

3. Стоимость элементов первого улучшенного варианта

$З_1=2*2.5+3=8$ у.е.

4. Стоимость изделия первого улучшенного варианта

$С_1=8/0.5=16$ у.е.

5.Коэффициент готовности изделия улучшенного варианта (по формуле полной вероятности) $К_г(2У)К_г(П)+К_г(У)(1-К_г(П))$, где $К_г(2У)=0.99$ – коэффициент готовности двух усилителей, соединенных параллельно; $К_г(П)=0.99$ – коэффициент готовности переключающего устройства. Таким образом,

$К_г=0.99*0.99+0.90*0.01=0.987$.

6. Стоимость элементов изделия второго улучшенного варианта (три усилителя соединены параллельно) $З_2$=32.5+3=10.5 у.е.
7. Стоимость изделия второго улучшенного варианта
   $С_2=З_2/\psi=10.5/0.5=21$ у.е.

8. Коэффициент готовности изделия второго уровня улучшенного варианта
   $К_г=К_г(З_0У)*К_г(П)+К_г(У)(1-К_г(П))=$
   $0.999*0.99+0.9*0.001=0.999$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Выполняемые штатные операции \ Составные части ГП	Насосная станция	Привод домкратов	Привод ГЗМ	Привод стрелы	Привод механизма Заштыривания стрелы	ПАД	РН
Опуск стрелы от РН	-	-	-	-	-	-	20
Опуск стрелы от ДГН	10 м	-	-	10 м	-	-	-
Подъем стрелы от ХД	12 м	80 м	30 с	-	5-10	-	-
ОР	-	-	-	-	-	24 с	-
Подъем(опускание) на технологический угол	15 м	80 с	-	15с 19с	6-14	-	-
Разгрузка бескрановым способом	25 м	80 с	45-50	21 м	6-14	-	-
Разгрузка(погрузка) изделия	15 м	90 с	-	-	11-24	-	-
Свертывание агрегата в сооружении	12 м	80 с	45-50	-	6-14	-	-
Свертывание агрегата в поле	12	80 с	45-50	-	6-14	-	-
Развертывание агрегата в сооружении	12 м	80 с	46-54	-	5-10	-	-
Развертывание агрегата в поле	12 м	80 с	46-54	-	5-10	-	-

Таблица 2
Значения интенсивности отказов элементов

Наименование изделий	λ_0 10^{-6} 1/ч	$\lambda_{хр}$ 10^{-8} 1/ч
1	2	3
Электрические элементы		
Автоматы защиты сети		
АЗС, АЗСГ	50.00	2.0000
АЗ100К	1.14	0.0500
АЗ100П	0.14	
Агрегаты питания		
АБ-4-0/230-М1, АБ-8-Т/400-М1	1915.00	
ЭСБ-12-ВС/400-М1	2439.00	
Батарея аккумуляторная	1.00	0.0400
Вентиляторы РСС10/10-I.I.II, РСС16/10-I.I.II.	3.57	
Вилка ШК	0.70	
Выключатель пакетный	4.00	0.1600
Выключатели путевые конечные ВПК-2110Н, ВПК-2111Н	1.00	0.0400
Генераторы ГАБ-4-Т/400МI, ГАБ-8-Т/400	50.00	2.0000
Генераторы Г290	16.50	1.1000
Гнездо штепсельное ШК	0.70	
Дроссели Д1-Д69	0.28	0.5600
Диоды германиевые выпрямительные Д9Б, Д9В, Д9Г, Д9Д, Д9Е, Д9Ж, Д9И, Д9К, Д9Л, Д9М	1.60	
Диоды кремниевые выпрямительные		
Д223, Д223А, Д223Б	0.50	
Д229А	2.50	0.3500
Д231А	5.00	0.7000
Д237А, Д237Б, Д237В	3.00	0.7000
2Д102А	0.33	
2Д106А	0.77	
2Д101Г	4.00	
2Д202В, 2Д202Г, 2Д202Д, 2Д202Е, 2Д202Ж, 2Д202И, 2Д202К, 2Д202Л, 2Д102М, 2Д202Н, 2Д202Р	0.60	

Продолжение табл.2

1	2	3
2Д204В, 2Д207А	0.84	
Диоды импульсные кремниевые		
Д219А, Д220Б	1.00	
2Д503А, 2Д503Б	0.50	
2Д509А	2.00	
2Д510А	3.70	
Диоды универсальные кремниевые		
Д104, Д104А	5.00	0.7000
Держатели предохранителей		
БЗ-30К, БЗ-20К	2.60	
ДВП2Т, ДВП3Т, ДВП4Т	0.10	
ДПБ, ДПБТ	0.59	0.1000
ДПК1, ДПК3, МДП1, МДП1-1Т, МДПТ-1	0.50	
Кнопки		
КМ1-1, КМ2-1, КМА-1, КМД1-1, КМД2-1	2.00	
МПК1-4	4.00	
Серии ПК	8.00	
Конденсаторы бумажные		
БГТ	1.80	
К40П-2	0.60	
К40У-9	0.39	
Конденсатор металлобумажныйК42У-2	0.70	
Конденсатор металлопленочные		
К71-4, К71-5	1.20	0.0300
К73П-3, К73П-4	0.20	0.0300
К76П-1, К76-4	1.10	
К73-3, К77-1, К77-2	1.20	
Конденсатор комбинированный К75-10	0.50	0.0300
Конденсаторы слюдяные		
КСГ, СГМ	1.20	0.0100
КСОТ	0.60	0.0100
Конденсатор СТЕКЛЯННЫЙ к21-7	0.30	
Конденсаторы керамические Постоянной емкости		
КЛГ	0.50	0.0050
КМ4, КМ5	0.80	0.0050

Продолжение табл.2

1	2	3
КМ6	0.30	0.0050
Конденсаторы с оксидным диэлектриком алюминиевые		
К-50-3А, К-50-3Б	3.90	0.040
К-50-15, К-50-20	0.90	0.0400
Конденсаторы с оксидным диэлектриком танталовые		
К52-1, К52-2	0.20	0.0900
К53-1А	0.50	0.0900
К53-7, К53-18	0.90	0.0900
Кремниевый выпрямительный столб 2Ц106Б	1.44	2.9000
Клеммы КП1а, КП1б	0.05	
Контакторы		
КНТ-М, КНТ-К, КНТ-С	7.00	
ТКД.233.ДОД, ТКД.501.ДОД, ТКД.203.ДОД, ТКМ.201.ДОД, ТКС.103.ДОД, ТКС.103.ДОДБ, ТКС.133.ДОД, ТКС.233.ДОД	7.00	0.2800
Лампы осветительные А12	1.14	0.0100
Лампы сигнальные		
МН, МН-В, СМ-28-2,8, СМ28-2,8-В	8.00	0.0800
СМ13, СМ13-В, СМ26, СМ26-В	1.14	0.0100
Лампы индикаторные ИН-12А, ИН-12Б	8.70	
Микротумблеры МТ1, МТ3, МТД1, МТД3	0.90	1.0000
Переключатели дистанционные		
ДП-1-2	33.00	
РПС-20	8.00	
Предохранители		
ВП1-1, ВП1-2, ВП-2Б-1, ВП-2И, ВПЗТ-1	0.7%	0.3000
ИП	0.01	0.0010
Серии СП, ПК	0.70	0.3000
Переключатель движковый ЦДМ	0.16	1.0000
Платы соединительные ПС	0.10	
Переключатели галетные		
ПГ2, ПГ3, ПГК, ПГТ, ПМ	2.00	0.0800
П2Г-3	10.00	0.4000

Продолжение табл.2

1	2	3
Переключатели кулачковые малогабаритные серии ПКМ, ПКМ-Т	2.00	0.8000
Переключатели пакетно-кулачковые серии ПК	3.00	0.1200
Провода БПВЛ, БПВЛЭ, МГШВ, ПТЛ-250	0.50	
Резисторы постоянные		
Непроволочные ВС	0.70	0.0200
МОН	1.30	0.0030
ОМЛТ, ОМЛТ-0.125 вт	0.14	0.1000
С2-13, С2-29Т	0.30	0.0030
Резисторы постоянные проволочные		
ОПЭВЕ	1.00	0.0400
ПЭВ-Т, С5-5	1.20	0.0400
С5-16Т	0.40	0.0400
С5-22, С5-25Т, С5-35, С5-47	1.50	
Резисторы переменные непроволочные		
СП, СП4-1, СП4-2М, СП4-3	2.00	
Резисторы переменные проволочные		
ППБ	2.00	
ПП3-40, ПП3-47	1.60	
СП5-1,СП5-2Т, СП5-15, СП5-30	6.80	
Реле безопасности РБП	20.00	
Реле с вакуумными и магнитоуправляяемыми контактами		
РЭС-42, РЭС-43, РЭС-55	2.90	2.1000
Реле поляризованные РП-5, РП-7	8.00	
Реле электромагнитные РМУ	4.00	0.3000
РМ-4-К, РЭН-33, 8Э12, 8Э13, 8Э14	5.00	0.2000
РЭМ	10.00	0.4000
РЭС9, РЭС15, РЭС22, РЭС32, РЭС47, РЭС49, РЭС60	4.00	0.3000
Реле электротепловые		
РТН-3	30.00	
ТРМ-К, ТР-2	7.00	
Разъемы штепсельные	0.05	0.3000
Светодиоды		
2Л101А, 2Л101Б	0.57	4.9000

Продолжение табл.2

1	2	3
3Л102А, 3Л102Б, 3Л102Г	1.53	4.9000
3Л103А, 3Л103Б, 3Л108П	0.61	4.9000
Стабилизаторы кремниевые		
Д814А, Д814Б, Д814В, Д814Г, Д814Д	1.00	0.2500
Д815-Д817	0.82	0.2500
Д818А-Д818Е	1.20	0.2500
2С107А	0.44	0.2500
2С113А	4.60	0.2500
2С133А, 2С139А, 2С147А, 2С156А, 2С168А	0.08	0.2500
2С433А, 2С439А, 2С456А, 3С468А	0.32	0.2500
Светильники		
ГСТ64-2М	1.50	0.0200
ПС-60-2М	1.00	0.0100
Соединительные резьбовые нормальных габаритов 2РТ-А, 2РТТ, СШР, ШР	20.00	
Соединительные резьбовые малогабар.		
2РМД-В1, 2РМ-В1	7.50	
2РМДТ-В1	20.00	
2РМГ, 2РМГД, 2РМГС	10.00	
Соединительные резьбовые миниатюрные РС	8.00	
Соединительные для объемного монтажа малогабаритные		
РПМ13	5.00	
РПБ	6.00	
Соединительные для печатного монтажа		
РШ2Н-2	5.00	
Соединители типа СР	0.40	
Тумблеры серии П2Т, П2Т-Т	0.34	1.0000
Тиристоры триодные		
ВКДУ, Т4	0.31	0.4800
2У101А-2У101И	0.17	
2У102А-2У102Г	0.31	0.4800
2У201А-2У201Л, 2У202Д-2У202Н	0.55	
Транзисторы германиевые маломощные низкочастотные		
МП10А, МП10Б	1.20	

Продолжение табл.2

1	2	3
МП20, МП21, МП21А, МП21Б	1.50	
Транзисторы кремниевые маломощные низкочастотные 2Т117А-2Т117Г	0.30	0.8700
Транзисторы кремниевые малогабаритные среднечастотные		
П307-П309	1.00	
2Т201	0.31	
2Т203	0.80	
2Т208	0.45	0.9000
Транзисторы германиевые маломощные высокочастотные		
1Т308А, 1Т308Б, 1Т308В	0.70	
1Т321Б, 1Т321В	0.14	
1Т329В	0.52	
Транзисторы кремниевые маломощные высокочастотные		
2Т306В	0.31	
2Т312А, 2Т312Б, 2Т312В	0.43	
2Т316А-2Т316Д	0.41	
2Т325А,2Т325Б, 2Т325В	0.78	
2Т326Б	0.52	
2Т355А	0.55	0.8800
Транзисторы германиевые средней мощности низкочастотные		
1Т403А-1Т403И	1.20	
Транзисторы германиевые средней мощности среднечастотные		
П605, П605А	6.00	
Транзисторы кремниевые средней мощности высокочастотные		
2Т602А, 2Т602Б	1.00	
2Т603А, 2Т603Б, 2Т603В, 2Т603Г	0.92	
2Т608А, 2Т608Б	1.60	
Транзисторы германиевые большой мощности низкочастотные		
П210Ш	2.00	
П213А, П213Б	1.50	
П217А, П217Б, П217В, П217Г	3.00	

Продолжение табл.2

1	2	3
Транзисторы кремниевые большой мощности низкочастотные П306	3.00	
Транзисторы германиевые большой мощности среднечастотные 1Т806А, 1Т806Б, 1Т806В	3.84	4.0000
Транзисторы кремниевые большой мощности среднечастотные		
П701, П701А	1.20	
2Т803А	6.70	
2Т808А	1.10	
2Т809А	2.20	1.3000
Транзисторы кремниевые большой мощности высокочастотные		
2Т903А, 2Т903Б	2.70	
2Т904А	4.90	
2Т908А	4.50	
Транзисторы полевые		
2П103А-2П103Г	0.44	
2П301А, 2П301В	0.70	
2П302А, 2П302Б, 2П302В, 2П304А, 2П305А-2П305Г, 2П350А, 2П350Б	0.36	0.4000
2П303А-2П303Е	0.95	
Терморезисторы		
КМТ	1.00	0.0030
ММТ	5.00	0.0030
Трансформаторы		
МИТ-М	0.80	1.1000
ОВ	0.57	0.2000
ТА, ТН, ТАН	0.05	11.5000
ТПП	0.04	1.1000
ТИ, ТИГ	0.85	1.1000
Тахогенератор ТГП-3	16.50	1.1000
Фотодиоды	6.00	
Фонари сигнальные ФИ1, ФМ2, ФРМ1-ФРМ3, ФШМ1-ФШМ3	1.80	0.2000
Электродвигатели АА56-4, АВ-052-2М	35.00	

Продолжение табл.2

1	2	3
АБВ-052-2М, Д-25А	40.00	
АПН	50.00	
ДПТ-22-С2	90.00	
ИД-100А	33.00	
Серии от МАП100 до МАП600	3.00	0.0600
Частотомер В-86	7.00	
Электронагреватели ТЭН-32А13/0, 32Н110, ТЭН-44А13/0, 30Н127, ТЭН-78А13/0, 80Н127, ЭТ-32, ЭТ-44, ЭТ-80	0.50	0.0150
Электроизмерительные приборы	7.00	
Гидравлические элементы		
Вентиль для гидравлики 629600В-Т	115.00	1.1500
Вентиль для гидравлики 652600А-Т	286.40	2.8600
Вентиль электропневматический ВВ-02	0.25	0.0030
Гидравлический звук двухсторонний ГА88-007к	38.30	0.4000
Гидравлический замок ГАIII	87.60	0.8800
Гидромотор ГМ-35	200.00	2.0000
Гидромотор ГМ-37-00-4	12.00	0.1200
Гидроцилиндр	75.00	0.7500
Двухпозиционный золотник с электромагнитным управлением ГА158	48.40	0.4800
Двухпозиционный электромагнитный кран ГАГ65	76.70	0.7700
Дроссельный кран ГА230Т	88.60	3.0000
Клапан обратный ОК4А-ОК20А	2.50	0.0250
Клапан разъема 637200-Т	1014.00	10.1400
Клапан разъема 637500-Т	1049.00	10.4900
Кран распределительный Кр-6	1.00	0.0100
Кран сливной 636700-Т	289.10	2.8900
Краны электромагнитные ГА192, КЭ5А	0.13	0.0010
Манометры МПЗ-С-400		
Насосы Н403А, 1405/8Е35	13.50	0.1350
Предохранительный клапан ГА22/2	2.40	0.0240
Предохранительный клапан ГА186М	32.90	0.3290
Реверсивный порционер ГА57/1У	38.90	0.3890
Реверсивный порционер ГА215	20.00	0.2000

Продолжение табл.2

1	2	3
Регулятор расхода ГА231	700.00	7.0000
Ручной насос НР01-00-2	24.10	0.2410
Сигнализатор давления сдвоенный (с демпфером Д-59-2)2С-100А	176.00	1.7600
Термический клапан ГА133-100-3К	57.10	0.5710
Трехпозиционный кран с электромагнитным управлением ГА142/2	152.80	1.5280
Трехпозиционный кран с электромагнитным управлением ГА144	11.90	0.1190
Трехпозиционный электромагнитный кран ГА163А	74.50	0.7450
Фильтры гидравлические ФГIIСН-I, 14ГФ19СН	4.00	0.0400
Фильтр гидравлический 14ГФСН-I	5.30	0.0530
Челночный клапан УГЭ7	30.40	0.3040
Электромагнитный кран с гидрозамком ГА164М/2	0.50	0.0050
Механические изделия		
Амортизаторы кольцевые (комплект)	0.04	0.0004
Амортизаторы кольцевые с опорой и крепежом	1.29	0.0120
Амортизаторы	23.50	0.2359
Арматура механическая	60.00	0.6000
Зубчатые пары	0.50	0.2500
Канаты	2.70	0.0270
Канаты стальные	0.01	0.0001
Кожух	1.70	0.0120
Колеса моста	119.40	1.1940
Муфта жесткая	16.00	0.0370
Муфта зубчатая	3.70	0.0006
Муфты принудительного действия	0.06	0.0004
Муфты соединительные вращающиеся	0.04	0.0150
Муфты управления соединительные	1.52	0.0004
Муфты упругие	0.04	0.0030
Подшипники качения	10.76	0.1070
Подшипники скольжения	7.50	0.0750
Подшипники для тяжелого режима	1.80	0.0180

Окончание табл. 2

1	2	3
Пружины возвратные специальные	0.01	0.0001
Пружины подвески	4.00	0.0400
Пружины	3.00	0.0300
Трубки соединительные	0.80	0.0080
Уплотнительные прокладки	0.58	0.0050
Фрикционная передача	2.10	0.0210
Шарнир Гука	0.99	0.0090
Шплинты и штифты	1.60	0.0100
Шины, используемые в автопоезде “тягач МАЗ-537 с полуприцепом”	7.00	0.0720
Шестерни	0.50	0.0050

Таблица 3

Значение

χ^2 в зависимости от k=2n и 1-α/2 или α/2

Степень свободы	Значения вероятностей 1-α/2 или α/2						
	0.99	0.98	0.95	0.90	0.80	0.70	0.50
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.000	0.001	0.004	0.016	0.064	0.148	0.455
2	0.020	0.040	0.103	0.211	0.446	0.713	1.386
3	0.115	0.185	0.352	0.584	1.005	1.424	2.37
4	0.297	0.429	0.711	1.064	1.649	2.29	3.36
5	0.554	0.752	1.145	1.61	2.34	3.00	4.35
6	0.872	1.134	1.635	2.20	3.07	3.83	5.35
7	1.239	1.564	2.17	2.83	3.82	4.67	6.35
8	1.646	2.03	2.73	3.49	4.59	5.53	7.34
9	2.09	2.53	3.32	4.17	5.38	6.39	8.34
10	2.56	3.06	3.94	4.86	6.18	7.27	9.34
11	3.05	3.61	4.58	5.53	6.99	8.15	10.34
12	3.57	4.18	5.23	6.30	7.81	9.03	11.34
13	4.11	4.76	5.89	7.04	8.63	9.99	12.34
14	4.66	5.37	6.57	7.79	9.47	10.82	13.34
15	5.23	5.98	7.26	8.55	10.31	11.72	14.34
16	5.81	6.61	7.96	9.31	11.15	12.62	15.34
17	6.41	7.26	8.67	10.08	12.00	13.53	16.34

Окончание табл.3

1	2	3	4	5	6	7	8
18	7.02	7.91	9.39	10.86	12.86	14.44	17.34
19	7.63	8.57	10.11	11.65	13.72	15.35	18.34
20	8.26	9.24	10.85	12.44	14.58	16.27	19.34
21	8.90	9.92	11.59	13.24	15.44	17.18	20.3
22	9.64	10.60	12.34	14.04	16.31	18.10	21.3
23	10.20	11.29	13.09	14.85	17.19	19.02	22.3
24	10.86	11.99	13.85	15.66	18.06	19.94	23.3
25	11.52	12.70	14.61	16.47	18.94	20.9	24.3
26	12.20	13.41	15.38	17.29	19.82	21.8	25.3
27	12.88	14.12	16.15	18.11	20.7	22.7	26.3
28	13.56	14.85	16.93	18.94	21.6	23.6	27.3
29	14.26	15.57	16.71	19.77	22.5	24.6	28.3
30	14.95	16.31	18.49	20.6	23.4	25.5	29.3

Степень Свободы	Значения вероятностей 1-α/2 или α/2						
	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	1.074	1.642	2.71	3.84	5.41	6.64	10.83
2	2.41	3.22	4.60	5.99	7.82	9.21	13.82
3	3.66	4.61	6.25	7.82	9.84	11.34	16.27
4	4.88	5.99	7.78	9.49	11.67	13.28	18.46
5	6.06	7.29	9.24	11.07	13.39	15.09	20.5
6	7.23	8.56	10.64	12.59	15.3	16.81	22.5
7	8.38	9.80	12.02	14.07	16.62	18.48	24.3
8	9.52	11.03	13.36	15.52	18.17	20.1	26.1
9	10.56	12.24	14.68	16.92	19.68	21.7	27.9
10	11.78	13.44	15.99	18.31	21.2	23.2	29.6
11	12.90	14.63	17.28	19.68	22.6	24.7	31.3
12	14.01	15.81	18.55	21.0	24.1	26.2	32.9
13	15.12	16.98	19.31	22.4	25.5	27.7	34.6
14	16.22	18.15	21.1	23.7	26.9	29.1	36.1
15	17.32	19.31	22.3	25.0	28.3	30.6	37.6
16	18.42	20.5	23.5	26.3	29.6	32.0	39.9
17	19.51	21.6	24.8	27.6	31.0	33.4	40.8
18	20.6	22.8	26.0	28.9	32.3	34.8	42.3
19	21.7	23.9	27.2	30.1	33.7	36.2	43.8
20	22.8	25.0	28.4	31.4	35.0	37.5	45.3
21	23.9	26.2	29.6	32.7	36.3	38.9	46.8

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
22	24.9	27.3	30.8	33.9	37.7	40.3	48.3
23	26.0	28.4	32.0	35.2	39.0	41.6	49.7
24	27.1	29.6	33.2	36.4	40.3	43.0	51.2
25	28.2	30.7	34.4	37.7	41.7	44.3	52.6
26	29.2	31.8	35.6	38.9	42.9	45.6	54.1
27	30.3	32.9	36.7	40.1	44.1	47.0	55.5
28	31.4	34.0	37.9	41.3	45.4	48.3	56.9
29	32.5	35.1	39.1	42.6	46.7	49.6	58.3
30	33.5	36.2	40.3	43.8	48.0	50.9	59.7

Таблица 4

Значения параметра t_γ - распределения Стьюдента

Степень свободы k=n-1	Значения доверительной вероятности γ					
	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
1	2	3	4	5	6	7
1	1.963	3.08	6.31	12.31	31.8	63.7
2	1.336	1.886	2.92	4.30	6.96	9.92
3	1.250	1.638	2.35	3.18	4.54	5.84
4	1.190	1.553	2.13	2.77	3.75	4.60
5	1.156	1.476	2.02	3.57	3.36	4.03
6	1.134	1.440	1.943	2.45	3.14	3.71
7	1.119	1.415	1.895	2.36	3.00	3.50
8	1.108	1.397	1.860	2.31	2.90	3.36
9	1.100	1.383	1.833	2.26	2.82	3.25
10	1.093	1.372	1.812	2.23	2.76	3.17
11	1.083	1.363	1.796	2.20	2.72	3.11
12	1.083	1.356	1.782	2.18	2.68	3.06
13	1.079	1.350	1.771	2.16	2.65	3.01
14	1.076	1.345	1.761	2.14	2.62	2.98
15	1.074	1.341	1.753	2.13	2.60	2.95
16	1.071	1.337	1.746	2.12	2.58	2.92
17	1.069	1.333	1.740	2.11	2.57	2.90
18	1.067	1.330	1.734	2.10	2.55	2.88
19	1.066	1.328	1.729	2.09	2.54	2.86
20	1.064	1.325	1.725	2.09	2.53	2.84
21	1.063	1.323	1.721	2.08	2.52	2.83
22	1.061	1.321	1.717	2.07	2.51	2.82

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
23	1.060	1.319	1.714	2.07	2.50	2.81
24	1.059	1.318	1.711	2.06	2.49	2.80
25	1.058	1.316	1.708	2.06	2.48	2.79
30	1.055	1.310	1.697	2.04	2.46	2.75
40	1.050	1.303	1.684	2.02	2.42	2.70
60	1.046	1.296	1.671	2.00	2.39	2.66
120	1.041	1.289	1.658	1.980	2.36	2.62
	1.036	1.282	1.645	1.960	2.33	2.58

Таблица 5

Значения функции e^{-x}

	0	2	4	6	8
0.0	1	0.980	0.961	0.942	0.923
0.1	0.905	887	869	852	835
0.2	819	803	787	771	756
0.3	741	726	719	698	684
0.4	670	657	644	631	619
0.5	0.607	0.595	0.583	0.571	0.560
0.6	549	538	527	517	507
0.7	500	487	477	468	458
0.8	449	440	432	423	415
0.9	407	398	391	383	375
1.0	0.368	0.361	0.353	0.346	0.340
1.1	333	326	320	314	307
1.2	301	295	289	284	270
1.3	273	267	262	257	252
1.4	247	242	237	232	228
1.5	0.223	0.219	0.214	0.210	0.206
1.6	202	196	194	190	186
1.7	183	179	176	172	169
1.8	165	162	159	156	153
1.9	150	147	144	141	138

Окончание табл. 5

	0	2	4	6	8
2.0	0.135	0.133	0.130	0.128	0.125
2.1	123	120	118	115	113
2.2	111	109	107	104	102
2.3	100	098	096	095	093
2.4	091	087	087	085	084

Таблица 6

Значения функции Г(1+1/x)

Значение величины X	Значение функции Г(1+1/x)
1.20	0.941
1.25	0.931
1.30	0.923
1.35	0.917
1.40	0.911
1.45	0.907
1.50	0.903
1.55	0.899
1.60	0.896
1.65	0.894
1.70	0.892
1.75	0.890
1.80	0.889
1.90	0.887
2.00	0.886

Таблица 7

Значения функции $f_1(\frac{a-t}{x})$ для нормального распределения

x	$f_1(x)$	x	$f_1(x)$	x	$f_1(x)$	x	$f_1(x)$

-6.0	6.158	-3.0	3.283	0.0	0.798	3.0	0.02444
-5.9	6.061	-2.9	3.190	0.1	0.735	3.1	0.02327
-5.8	5.963	-2.8	3.098	0.2	0.675	3.2	0.02239
-5.7	5.866	-2.7	3.006	0.3	0.617	3.3	0.02172
-5.6	5.769	-2.6	2.914	0.4	0.562	3.4	0.02123
-5.5	5.672	-2.5	2.823	0.5	0.509	3.5	0.03873
-5.4	5.574	-2.4	2.732	0.6	0.459	3.6	0.03612
-5.3	5.477	-2.3	2.641	0.7	0.412	3.7	0.03425
-5.2	5.380	-2.2	2.552	0.8	0.368	3.8	0.03292
-5.1	5.283	-2.1	2.462	0.9	0.326	3.9	0.03199
-5.0	5.186	-2.0	2.373	1.0	0.288	4.0	0.03134
-4.9	5.090	-1.9	2.285	1.1	0.252	4.1	0.04893
-4.8	4.993	-1.8	2.197	1.2	0.219	4.2	0.04589
-4.7	4.897	-1.7	2.110	1.3	0.190	4.3	0.04385
-4.6	4.800	-1.6	2.024	1.4	0.163	4.4	0.04249
-4.5	4.704	-1.5	1.939	1.5	0.139	4.5	0.04160
-4.4	4.608	-1.4	1.854	1.6	0.117	4.6	0.04101
-4.3	4.512	-1.3	1.770	1.7	0.0984	4.7	0.05637
-4.2	4.417	-1.2	1.688	1.8	0.0819	4.8	0.05393
-4.1	4.321	-1.1	1.606	1.9	0.0676	4.9	0.05244
-4.0	4.226	-1.0	1.525	2.0	0.0552	5.0	0.05149
-3.9	4.1130	-0.9	1.446	2.1	0.0448	5.1	0.06897
-3.8	4.035	-0.8	1.367	2.2	0.0360	5.2	0.06536
-3.7	3.940	-0.7	1.290	2.3	0.0286	5.3	0.06317
-3.6	3.846	-0.6	1.215	2.4	0.0226	5.4	0.06186
-3.5	3.751	-0.5	1.141	2.5	0.0176	5.5	0.06108
-3.4	3.657	-0.4	1.069	2.6	0.0136	5.6	0.07618
-3.3	3.563	-0.3	0.998	2.7	0.0105	5.7	0.07351
-3.2	3.470	-0.2	0.929	2.8	0.02794	5.8	0.07198
-3.1	3.370	-0.1	0.863	2.9	0.02596	5.9	0.07110
-3.0	3.283	-0.0	0.798	3.0	0.02444	6.0	0.08610

Таблица 8

Значение коэффициента K_φ

Условия эксплуатации		Значение коэффициента K_φ
Относительная влажность, %	Температура, T_0, С	
60-70	20-30	1.00
90-98	20-25	2.00
90-98	30-40	2.50

Таблица 9

Значение коэффициента эксплуатации $К_э$

Наименование изделия	$К_э$
Реле электромагнитные слаботочные	1.0
Реле электромагнитные средней мощности	1.1
Реле поляризованные	1.1
Реле-искатели	1.2
Реле времени	1.2
Автоматические кнопки	1.3
Реле тепловые	1.3
Электродвигатели	1.3
Контакторы	1.2
Сельсины	1.5
Вращающиеся трансформаторы	2.0
Тахогенераторы	1.8
Фазовращатели и фазорегуляторы	1.8
Редукторы	1.0
Электромагнитные муфты	1.2
Муфты соединения	1.0
Диафрагмы	1.0
Пружины	1.2
Кинематические пары	1.0
Кулачковые пары	1.0
Клапаны	1.1
Насосы	1.1
Гнезда	1.2
Фонари	1.3

Таблица 10

Значение коэффициента $К_н$

T ^{0}C	Знчение коэффициента $К_н$ при коэффициенте $К_{р,и}$ равном							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

20	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.0
30	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.1
40	0.1	0.2	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2	1.3
50	0.2	0.2	0.3	0.7	0.9	1.3	1.4	1.5
60	0.2	0.3	0.4	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8
70	0.3	0.4	0.6	1.2	1.4	1.7	2.1	2.4

Таблица 11

Значение функции R<= $\varphi(\gamma, n_{ср})$

К определению количества запасных элементов

$n_{ср}$	γ					
	0.8	0.85	0.9	0.95	0.98	0.99
1	2	3	4	5	6	7
10	13	13	14	15	17	18
20	24	25	26	27	29	31
30						
40	45	46	48	50	53	55
50						
60	66	66	70	73	76	78
80	87	89	92	95	99	101
100	108	110	113	116	120	124
200	210	216	219	222	228	233
500	516	521	527	535	542	559

Таблица 12

Комплектующие элементы	Цена за штуку, руб.
1	2
Аналоговые микромодули и схемы	
Усилитель операционный (для работы в гибридных схемах, микросборках, блоках и аппаратуре)	0.60
Переключатель аналоговый	1.80
Усилитель промежуточной частоты звука	0.90

Продолжение табл. 12

1	2

Усилитель мощности (для работы в аппаратуре широкого применения)	1.50
Усилитель постоянного тока	1.50
Цифровые микромодули и схемы	
Счетчик 4-разрядный	3.00
Дешифратор на три входа	4.00
Три элемента ‘ИЛИ-НЕ’	5.00
Устройство оперативное запоминающее	5.00
Регистр сдвига 24-разрядный	0.80
Устройство для обмена информацией	9.00
Устройство арифметическое	7.00
Схема контроля четности	2.00
Счетчик десятичный сипхронный	1.80
Полупроводниковые приборы	
Диод германиевый:	
Выпрямительный	0.20
Универсальный	0.40
Импульсный	0.20
Диод германиевый:	
Туннельный	3.00
Смесительный	0.40
Диод кремниевый:	
Выпрямительный	0.60
Стабилитрон	0.80
Транзистор германиевый малой мощности:	
Низкой частоты	0.40
Высокой частоты	1.00
Транзистор кремниевый малой мощности:	
Низкой частоты	0.80
Высокой частоты	7.00
Полевой	6.00
Тиристор:	
Неуправляемый	0.80
Управляемый	2.00

Продолжение табл.12

1	2

Конденсаторы	
Для работы в цепях постоянного, переменного токов и в импульсном режиме:	
Емкостью до 6800 пФ	2.00
Емкостью свыше 6800 пФ	3.00
Стабилизаторы напряжения(стабилитроны)	
Электровакуумный прибор в стеклянном миниатюрном оформлении	2.00
Панели индикаторные	
Для отражения графической и знаковой индикации	280.00
Для изображения цифр из отдельных сегментов	20.00
Матричная для преобразования электрических сигналов в видимое изображение	700.00
Резисторы	
ОМЛТ	0.10
СП5	2.00

Список использованных источников

1. Алымов В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка: учебное пособие. - М.: Академия, 2005. -118 с.

2. Гуськов А. В. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник / А. В. Гуськов, К. Е. Милевский. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 427 с.

3. Шубин В. С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств: учеб. пособие. - М.: Химия, КолосС, 2006. – 359 с.

4. Ковалев А. П. Экономическое обеспечение надежности машин / А. П. Ковалев, В. И. Кантор, А. Б. Можаев. - М.: Машиностроение, 1991. —240 с.

5. ГОСТ27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://cert.obninsk.ru/gost/279/279.html. - Загл. с экрана.

6. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко,

7. Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. - М.: Наука, 1965. - 524 с Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств / В. В. Кафаров [и др.]. - М.: Химия, 1987

8. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М., 1990 г.

9. ГОСТ 27.003.90 Надежность в технике. Состав и общие правила: задания требований по надежности. М., 1991 г

10. ГОСТ 27.31.95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. М., 1996 г.

11. ГОСТ 27.402.95 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля времени наработки ГОСТ 27.410.87 Надежность в технике. Методы

контроля показателей надежности и планы испытаний на надежность. М., 1988 г (Экспоненциальное распределение). М., 1996 г
12. Надежность технических систем. Справочник. М, Радиосвязь, 1985.
13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М, Наука, 1997г.
14. ГОСТ 27.002 – 89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М, 1990г.
15. ГОСТ 27.301 – 95 Расчет надежности. Основные положения, М, 1996г.
16. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности М, ВШ, 1985
17. Бабыев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. М, Недра, 1987г.
18. ГОСТ 27.31 – 95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. М, 1996г.
19. МЭК 300 – 3 – 1 Управление надежностью. Часть 3 Руководства. Раздел 1 Обзор методов анализа надежности. М, 1992г.
20. Гафаров Н.А. др. Определение характеристик надежности и технического состояния оборудования М, Недра, 2000.